„Experimentelle Untersuchungen zur Mobilität des Nucleus pulposus in lumbalen Bandscheiben."

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
der Medizinischen Fakultät der Universität Düsseldorf

vorgelegt von
Gunhild Vogel
1977

1978

Aus der Orthopädischen Klinik der
Universität Düsseldorf
Direktor: Prof. Dr. K.P.Schulitz

"Experimentelle Untersuchungen zur Mobilität des Nucleus pulposus in lumbalen Bandscheiben."

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
der Medizinischen Fakultät der Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Gunhild Vogel

1977

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität Düsseldorf

Der Dekan
der Medizinischen
Fakultät der Universität
Düsseldorf
gez.: Prof.Dr.A.Hopf

Referent
gez.: Prof.Dr.J.Krämer

Koreferent
gez.: Prof.Dr.H.Reh

Meinen Eltern

gewidmet

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41544318_0037

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

I) EINLEITUNG Seite 1

II) GRUNDLAGEN 2

1. Anatomie und Physiologie 2

a) Funktion 2
b) Das "Bewegungssegment" 2
c) Beschreibung der einzelnen Teile des Bewegungssegmentes 3
d) Form und Bewegungsmöglichkeit 8
e) Spezielle Anatomie der Lendenwirbelsäule 8

2. a) Feinstruktur 10
b) Biochemie 11
c) Biomechanik 13

3. Pathologie 17

a) Allgemeine Vorbemerkungen 17
b) Häufigkeiten 17
c) Pathologisch-anatomische Erscheinungsformen 19
d) Ursachen 22

III) EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN 24

1. Versuchsmethode 24

a) Vorbemerkung 24
b) Das Präparat 24
c) Das verwendete Untersuchungsmaterial 30

aa) Die Segmentverteilung 30
bb) Kriterien der zur Verwendung kommenden Präparate 31
cc) Die Altersklassen 31

d) Die Ausmessung 32

aa) Die Koordinatenbestimmung 32
bb) Das zentrale mobile Gewebe 33
cc) Bandscheibenbreite, Bandscheibentiefe 34
dd) Die Wanderung der Metallnadel 34
ee) Die Prozentangaben 34

2. Vorversuche Seite 36

a) Kontrastmittelinjektion 36
b) Der Bezugspunkt 36
c) Die möglichen Lagen der Metallnadel 37
d) Die Aufgaben der Metallnadel 38

IV) ERGEBNISSE 39

1. Die "Rückneigung" 39

2. Die "Seitneigung" 47

3. Die "Vorneigung" 56

V) DISKUSSION 65

VI) ZUSAMMENFASSUNG 72

LITERATURVERZEICHNIS I - VIII

LEBENSLAUF

I) EINLEITUNG

An der menschlichen Wirbelsäule lassen sich sehr viele bedrohliche Veränderungen finden, ohne daß der Patient zu seinen Lebzeiten das geringste Krankheitszeichen verspürt hat. Die Voraussetzung dafür, daß Schmerzen oder sogar Fehlhaltungen auftreten, ist die, daß die Veränderungen oder Deformitäten in eine Beziehung treten zu nervösem Gewebe. Auf der anderen Seite sind viele Fälle bekannt, bei denen stärkste Schmerzen angegeben werden, röntgenologisch sowie operativ jedoch keine pathologischen Veränderungen nachweisbar sind.

Man muß daher sagen, daß die Ursachen solcher Störungen, die im Ausbreitungsgebiet des Plexus lumbosacralis am besten als "Ischias" bekannt sind, nicht in einem bestimmten, für alle Fälle gleichartigen pathologischen Zustand oder Vorgang zu suchen sind, sondern in verschiedenen, nach Art und Wirkungsweise unterschiedlichen Veränderungen, die bei einer großen Variationsmöglichkeit zum gleichen klinischen Bild führen. Sehr bedeutsam ist in diesem Zusammenhang auch die Projektion psychischer Vorgänge auf die Wirbelsäule.

Quantitative Untersuchungen zum Thema der Veränderungen und Veränderbarkeiten im Bandscheibenbereich sind bisher noch nicht durchgeführt worden. Es steht an, die Verschiebbarkeit des Gallertkerns, die die Voraussetzung ist für einen möglichen Bandscheiben-Prolaps, experimentell nachzuvollziehen und die Ergebnisse dieser Versuche zu untersuchen und zu diskutieren. Hierdurch wird eine Grundlage geschaffen für die bisher nur aus Operations- und Sektionsberichten bekannten Angaben über Häufigkeiten, Altersverteilung, Art und Lokalisation der Gallertkern-Vorfälle.

II) GRUNDLAGEN

1. Anatomie und Physiologie

a) Funktion

Die menschliche Wirbelsäule hat in erster Linie eine statische und dynamische Funktion. Sie trägt den Kopf sowie den Schultergürtel mit den Armen. Sie überträgt ihr Gewicht und einen wesentlichen Teil des Rumpfgewichtes auf das Becken, über dem sie sich erhebt. Außerdem ist die Wirbelsäule Aufhängevorrichtung für den Brustkorb mit seinen verschiedenen inneren Organen. Eine weitere wesentliche Funktion ist die, daß die Wirbelsäule mittels der zu ihr hinstrebenden Muskeln und Bänder an allen Bewegungen des Kopfes und der Gliedmaßen teilnimmt und sie dirigiert. Für das Zentralnervensystem und bestimmte innere Organe bedeutet der "Achsenstab" (LINDEMANN 1953) außerdem Schutz vor Druck und Verletzung.

Alle diese Funktionen werden durch die Festigkeit auf der einen Seite, die durch Zwischenwirbelscheiben und Bogengelenke bedingte Elastizität auf der anderen Seite gewährleistet.

b) Das"Bewegungssegment"

Die Wirbelsäule setzt sich aus 23 entwicklungsgeschichtlich zu erklärenden "Bewegungssegmenten" (JUNGHANNS 1968) zusammen. Ein solches Bewegungssegment besteht aus der unteren Hälfte eines Wirbelkörpers, der darauffolgenden Zwischenwirbelscheibe und der oberen Hälfte des nächstunteren Wirbelkörpers. (Außerdem gehören dazu: Die Bogengelenke, der Bandapparat und die Muskeln.) Der Zwischenwirbelabschnitt macht insgesamt ungefähr ein Viertel der Wirbelsäulenhöhe überhaupt aus. Er nimmt von oben nach unten an Höhe zu und gestaltet sich entsprechend der sagittalen Krümmung der Wirbelsäule tra-

pezoidförmig. Die Zwischenwirbelscheibe bestimmt die intervertebralen Bewegungen. Das Ausmaß und die Richtung der Bewegungen werden jedoch von den Wirbelbogengelenken geregelt.

c) Beschreibung der einzelnen Teile des Bewegungssegmentes

Der Wirbelkörper hat beim Erwachsenen die Form eines kurzen Zylinderstückes, welches in den verschiedenen Abschnitten der Wirbelsäule unterschiedlich gestaltet ist. Die Höhe der Wirbelkörper nimmt im Laufe des Lebens in Relation zur Zwischenwirbelscheibe zu. Erste Verknöcherungsvorgänge werden im 3. Embryonalmonat beobachtet, die Form ist zunächst noch der eines Eies ähnlich. Beim Jugendlichen bemerkt man eine stufenförmige Aussparung, die den Wirbelkörperrand ringförmig umgibt: die "knorpelige Randleiste". Diese ist verzahnt in einer knöchernen Riffelung, die sich vom Wirbelkörperrand zur Mitte hinzieht. Sie besteht bis etwa zum 7.Lebensjahr und zeigt dann Knochenkernbildung. Vom 14. bis 15.Lebensjahr an verknöchert sie zunehmend mehr und verschmilzt dann mit dem Wirbelkörper.

Auf der Wirbelkörperoberfläche liegt oben und unten, zwischen Wirbelkörper und Bandscheibengewebe eingefügt, aber fest mit der Bandscheibe verbunden, eine aus hyalinem Knorpel bestehende, ungefähr 1 mm dicke Schicht, die "knorpelige Schlußplatte". Sie greift krempenartig in den Aussparungen am Wirbelkörperrand auf die Vorder-, Seiten- und Hinterfläche über.

Ringförmig eng gestaltet ist sie mit den bereits besprochenen Leisten und Rinnen verzahnt. Dies dient zum einen der festen Verbindung zwischen Knochen und Bandscheibe und außerdem der Oberflächenvergrößerung und damit der besseren Ernährung. An der Verbindungsfläche zwischen Wirbelkörper und knorpeliger Schlußplatte findet das Längenwachstum des Wirbelkörpers statt.

Die Zwischenwirbelscheibe in ihrer bikonvexen Form besteht zur Hauptsache aus zwei Anteilen: einem äußeren, dem Anulus fibrosus (= Faserring), und einem zentralen, dem Nucleus pulposus (= Gallertkern). Man könnte davon noch ein Zwischenstück unterscheiden, welches sich makroskopisch deutlich von beiden abtrennt (s.Bild), mikroskopisch aber als innerer Teil des Anulus fibrosus anzusehen ist.

Der Anulus fibrosus ist die eigentliche Verbindung zwischen den einzelnen Wirbelkörpern. Er besteht aus Lamellen, deren einzelne Fasern sehnig und derb sind und von einer Wirbelkörperendfläche zur nächsten in spiraligen Windungen verlaufen. Fasern benachbarter Lamellen kreuzen sich und sind entgegengesetzt ausgerichtet. Hierdurch kommt bei Dreh- und Torsionsbewegungen ein besonderer Widerstand in Form von Querverbindungen und Verflechtungen zustande. Die Fasern sind mit den Wirbelkörpern fest und unverschieblich verbunden, sie enden sowohl in dem Randleistenknochen in Form der Sharpeyschen Fasern als auch an anderen Partien der Deckplatten. Ventral und lateral ist der Faserring breiter, die Lamellen sind dicker und zahlreicher. Dorsal ist er schmaler, hier liegt auch sein schwächster Punkt, eine manchmal regelrechte Strukturauflösung infolge Rückbildung embryonaler Gefäße, die an dieser Stelle zahlreicher angelegt waren als irgendwo sonst in der Bandscheibe. Durch die Elastizität und Dehnbarkeit nimmt der Faserring die Druckkräfte auf, die ihm vom Gallertkern übertragen werden, und bildet einen seitlichen Gegenhalt. Außerdem stellt er durch seine biochemische Zusammensetzung eine semipermeable Membran dar, die den Austritt von hochmolekularen Substanzen aus dem Bandscheibenkern verhindern soll. Entwicklungsgeschichtlich entsteht der Anulus fibrosus als Folge zunehmender Biege- und Verschiebebeanspruchungen der Wirbel-

säule. Nach ÜBERMUTH (1929) entwickelt er sich erst im Laufe der Sitzphase des Kindes, andere Autoren (HIRSCH, SCHAJOWICZ 1953) fanden Faserring-Strukturen schon bei einem 7 Monate alten Feten.

Der Gallertkern liegt, eingeschlossen zwischen den beiden Deckplatten und dem Anulus fibrosus, am Übergang zwischen dem mittleren und hinteren Drittel der Zwischenwirbelscheibe. Er besteht aus stark hydrophilem, schleimig-weichem Gewebe, dessen Turgor zu einem Überdruck innerhalb der Bandscheibe führt, so daß zwar eine Verformung, aber kein Zusammenpressen möglich ist. Durch den Druck werden die Lamellen in Spannung gehalten. Der Quellungszustand des Nucleus pulposus variiert nur in geringem Maße (dadurch wird z.B. erklärt, daß der Mensch morgens um 1 bis 2 cm größer ist als abends), aber auch im Laufe des Lebens lassen sich leichte Schwankungen erkennen (der alte Mensch wird kleiner). Aufgabe des Gallertkerns ist es, den Druck, den er vom Faserring erhält, weiterzuleiten und auf Erfolgsorgane zu übertragen. Gefäße enthält die Zwischenwirbelscheibe nicht, ebenso soll eine Nervenversorgung vollständig fehlen. Hingegen fand ROOFE (1940) Nervenendigungen im dorsalen Anteil des Anulus fibrosus zusammen mit nervösem Material im Ligamentum longitudinale commune dorsale.

Der Wirbelbogen macht eine von Wirbelkörper und Bandscheibe unabhängige Entwicklung durch. Er gestaltet sich als ein Knochenring, der das Rückenmark umschließt und verschiedene Fortsätze aussendet, die zum Teil Hebel sind, an denen Muskeln ansetzen, zum Teil aber der gelenkigen Verbindung der Wirbel untereinander dienen: Gelenkfortsätze, Querfortsätze, Dornfortsätze, Mamillarfortsätze und schließlich der Processus costalis, aus dem später die Rippenanlagen auswachsen.

Die Gelenkfortsätze haben in verschiedenen Abschnitten der Wirbelsäule unterschiedliche Formen und Richtungen. Sie bilden zusammen mit der Zwischenwirbelscheibe die beweglichen Teile des Bewegungssegmentes. Sie sind überzogen von einer dichten Gelenkkapsel, innerhalb derer sich kleine halbmondförmige Menisken befinden können, die in den Gelenkspalt eindringen. Als die am stärksten innervierten Teile der gesamten Wirbelsäule sind die Bogengelenke von großer klinischer Bedeutung, da kleinste Störungen und Spannungen schon zu größter Schmerzhaftigkeit führen können. Das Zwischenwirbelloch wird gebildet oben und unten von je zwei benachbarten Bogenwurzeln, hinten von den Gelenkfortsätzen, vorne von den hinteren bis seitlichen Teilen der Zwischenwirbelscheiben und der Wirbelkörper. Wir finden als Auskleidung eine fibröse Faszie, die eine enge Verbindung zur Kapsel der Wirbelbogengelenke und zum Anulus fibrosus hat. Die Form des Kanals ist elliptisch, variiert jedoch innerhalb der einzelnen Wirbelsäulenabschnitte. Der Kanal ist prall gefüllt durch den Nervus spinalis und das Ganglion spinale, so daß sich jeder Druck oder sonstige Reiz, bedingt durch verschiedenartige Störungen im Bewegungssegment, direkt auf den Kanalinhalt in Form von Schmerzen auswirken kann.

Das Bändersystem ist bedeutsam für die Abbremsung zu starker Bewegungen. Wir finden ein Ligamentum longitudinale anterius, welches von einem Wirbelkörper zum anderen zieht und dabei die Bandscheibe und die knöcherne Randleiste überspringt. Das Ligamentum longitudinale posterius setzt im Gegensatz dazu an der Bandscheibe an, auf deren Höhe es sich verbreitert und bis zu den Gelenkfortsätzen zieht, während es sich entlang dem Wirbelkörper verschmälert. Es bildet eine Verstärkung der Zwischenwirbelscheibe von hinten und ist insofern von klinischer Bedeutung für den Bandscheiben-Prolaps, als es zahlreiche sensible Nervenendigungen enthält. Das Ligamentum flavum verbin-

det die Wirbelbögen miteinander, es bremst die Bewegungen der Wirbelbogengelenke ab. Es ist derb und elastisch und erhielt seinen Namen auf Grund der gelben Farbe, die von einem hohen Elastingehalt herrührt. Außerdem gibt es ein Ligamentum interspinale, ein Ligamentum supraspinale und zahlreiche kleine Bänder zwischen den Dornfortsätzen.

Die Muskeln dienen ebenfalls dem Halt von Wirbelkörper und Bandscheibe und sind gleichzeitig das motorische Element des Bewegungssegmentes. Man unterscheidet kurze Paravertebralmuskeln, welche direkt wirken, von langen, die nur auf weitere Entfernung bedeutsam sind. Wichtig für die Beweglichkeit der Wirbelsäule ist nicht besondere Kraft des einen oder anderen Muskels, sondern das richtige Zusammenspiel aller, welches nur durch eine vollständig funktionierende Innervation möglich ist.

Die Wirbelsäule verfügt über ein sehr verzweigtes Blutgefäßsystem, das mit der Umgebung und besonders auch mit dem Rückenmarkskanal und dem Rückenmark zusammenhängt, jedoch beim Erwachsenen nicht mehr in der Bandscheibe zu finden ist. Während der embryonalen Entwicklung ziehen Blutgefäße vom paravertebralen Bindegewebe her in den Anulus fibrosus hinein, erreichen aber nie seine Innenzone, nie den Gallertkern. Alle Blutgefäße bilden sich jedoch (TÖNDURY 1955) nach dem 2. Lebensjahr wieder zurück, so daß man schon beim vierjährigen Kind keine Blutgefäße in diesem Gebiet mehr finden kann. Man führt dies auf eine Druckatrophie zurück, da beim sitzenden oder stehenden Kleinkind der Belastungsdruck in der Bandscheibe größer ist als der intravasale Druck der Gefäße, so daß alles Blut herausgedrückt wird und die Gefäßwände atrophieren. Die Bandscheibe besitzt keine Nervenversorgung. Lediglich im hinteren Teil des knorpeligen Randleistenanulus, und auch dies nur an der Lenden-

wirbelsäule, konnte man Schmerzrezeptoren finden. Auch dieses Phänomen wird durch Druckatrophie während der ersten Lebensjahre erklärt. Hingegen besitzen das hintere Längsband und besonders die Gelenkkapsel der Bogengelenke sehr zahlreiche Nervenendigungen.

d) Form und Bewegungsmöglichkeit

Durch die oben beschriebenen elastischen Systeme wird die Wirbelsäule einer gebogenen Feder vergleichbar (BENNINGHOFF 1968). Eine aus dem Körper herausgelöste Wirbelsäule hat eine ganz bestimmte, durch Rumpfgewicht und Muskeltonus nur noch verstärkte S-förmige Eigenkrümmung. Charakteristischerweise finden wir im Bereich der Halswirbelsäule eine Konvexität nach vorne: die Halslordose. Dieser Teil des Achsenstabes ist auch der beweglichste. Vor- und Rückbeugung und Seitenneigung sind gut möglich. Die Brustwirbelsäule ist relativ unbeweglich , und wir finden hierbei eine Konvexität nach hinten, die sog. Brustkyphose. Im Bereich der Lendenwirbelsäule gibt es eine etwas stärkere Bewegungsmöglichkeit im Sinne von Vor- und Rückneigung, und die natürliche Eigenkrümmung zeigt sich erneut als eine Lordose. Diese Krümmungen entwickeln sich jedoch erst nach der Geburt.

e) Spezielle Anatomie der Lendenwirbelsäule

Die Lendenwirbelsäule umfaßt fünf etwa zylinderförmig gestaltete Wirbelkörper. Den Zwischenraum füllen die hier keilförmigen Zwischenwirbelscheiben aus. Charakteristisch für die menschliche Wirbelsäule ist der scharfe Knick zwischen Kreuzbein und Lendenwirbelsäule, das sog. Promontorium. Der Winkel, den beide einschließen (Lumbosacral-Winkel) beträgt 120° bis 164°, durchschnittlich 129° (BENNINGHOFF 1968). Als Bewegung sind nur die Beugung und die Streckung möglich. Eine Drehung

ist fast vollständig gehemmt durch die beinahe sagittal stehenden Gelenkflächen. An der oberen Lendenwirbelsäule können Rippenreste verbleiben, besonders groß in Form des Processus costarius. Der Querfortsatz des Lendenbereichs stellt sich hier nur durch eine kleine Erhebung dar, den Processus accessorius. An den oberen Gelenkfortsatz angelehnt findet sich noch ein Muskelhöcker, der Processus mamillaris. Er ist schon vom zwölften Brustwirbel an deutlich zu erkennen, aber erst im oberen Lendenbereich deutlich ausgeprägt, er verliert sich auch weiter unten wieder. Die Dornfortsätze in dieser Höhe sind sehr stark, seitlich abgeplattet und gerade nach hinten ausgerichtet. Im Wirbelloch finden wir eine Anschwellung, welche in situ durch das Ganglion spinale des Nervus spinalis ausgefüllt wird.

2. a) Feinstruktur

Es lassen sich an der Zwischenwirbelscheibe zwei Anteile voneinander trennen, die sich sowohl biochemisch als auch histologisch voneinander unterscheiden:

1. Anulus fibrosus, der Faserring,
   er besteht hauptsächlich aus Fasern.
2. Nucleus pulposus, der Gallertkern,
   er besteht vorwiegend aus Grundsubstanz und Bindegewebszellen.

Außerdem finden wir Fibroblasten, Knorpelzellen und vereinzelt, diese besonders im Gallertkern, Chordazellen als entwicklungsgeschichtlich bedingter Rest der Chorda dorsalis.

Der Anulus fibrosus als Verbindung zwischen den einzelnen Wirbelkörpern besteht aus 10 bis 12 konzentrisch gebauten Lamellen, welche aus dicht und regelmäßig gelagerten kollagenen Fasern aufgebaut sind. Die Fasern sind derb und sehnig und in Schichten angeordnet, welche voneinander durch ein lockeres, wabiges Maschenwerk getrennt sind, sie ziehen konzentrisch von einer Wirbelkörperendfläche zur anderen in spiraligen Windungen, und die Fasern benachbarter Lamellen kreuzen sich scherengitterartig, regelmäßig kommt es unter ihnen auch zu einem Faseraustausch. Der zwiebelschalenförmige Verlauf der Fasern tritt mit zunehmendem Alter deutlicher hervor.

Der Nucleus pulposus ist ein spiegelnd-glänzendes und feucht-quellendes Gewebe, das Kerngebiet ist glasig-gelatinös und gut abgegrenzt gegenüber dem Faserring. Mikroskopisch finden wir eine netzige Struktur der glasig-schleimigen Grundsubstanz mit verstreut eingelagerten Zellhaufen von bläschenförmigen Chordazellen, aber auch Knorpelzellen lassen sich nachweisen.

b) Biochemie

aa) Bradytrophie

Die Zwischenwirbelscheibe ist ein bradytrophes Gewebe, ihre embryonal angelegten Gefäße gehen schon nach dem zweiten Lebensjahr zugrunde. So ist sie angewiesen auf Ernährung durch Diffusion, und zwar zum einen aus den Gefäßen des Wirbelkörpers, die bis an die knorpelige Abschlußplatte heranreichen, aus den Gefäßen der Längsbänder und schließlich aus solchen des Periosts.

bb) Wassergehalt

Der Wassergehalt der Zwischenwirbelscheibe ist sehr groß, er wechselt je nach Lebensalter beträchtlich, bzw. er nimmt mit zunehmendem Lebensalter ab. Die Neugeborenen-Bandscheibe enthält 88 %, die eines Zwölfjährigen 80 %, die eines Zweiundsiebzigjährigen nur noch 70 % Wasser (JUNGHANNS 1968). Der Faserring enthält bei Neugeborenen 78 %, der Gallertkern 88 % Wasser, im dritten Lebensjahrzehnt hat der Faserring 70 %, der Gallertkern nur noch etwa 76 % Wassergehalt. Wir sehen, daß sich im Laufe des Lebens der Flüssigkeitsgehalt des Kerns immer mehr dem des Faserrings angleicht, während letzterer nahezu gleich bleibt. Das Wasser ist im Nucleus pulposus an hydrophile Mucopolysaccharide (MPS) gebunden. Seine Funktion ist zum einen die eines Lösungsmittels, in dem sich viele Reaktionen des Intermediärstoffwechsels abspielen, zum anderen die Funktion des Transportmittels von molekularen Substanzen und Produkten des Zellstoffwechsels sowie die der Elimination von Stoffwechselschlacken.

cc) Chemischer Aufbau

Der Gallertkern enthält in einem Gelzustand Makromo-

leküle vom Typ der löslichen Kollagene, Glycoproteide und MPS, die in einem Netzwerk miteinander verbunden sind. Dieses hochpolymere Netzwerk verleiht dem System Viskosität.

Das Kollagen liegt teilweise in feinen Fibrillen vor, in der Dicke denen des Anulus fibrosus ähnlich. Die Glycoproteide setzen sich zusammen aus Kohlenhydraten und Eiweißen, sie sind stark hydrophil und sehr zähflüssig. Sie haben offenbar die Aufgabe, die Fibrillen miteinander zu verbinden. Die mechanischen Eigenschaften des Gallertkerns sind bestimmt durch seine Hydrophilie, also gewissermaßen vom kolloidosmotischen Druck seiner Moleküle. Dieser nimmt ab mit zunehmendem Alter, da er von der Art, der Zahl und der Größe der Moleküle abhängt. Die Hyaluronsäuren sind typische Vertreter wasserbindender MPS. Wesentliche Bestandteile der sauren MPS sind ferner das Chondroitinsulfat, das Keratosulfat und das Heparin (DAHMEN 1963, HALL, HAPPEY, HORTON 1957, NAYLOR 1962). Das Chondroitsulfat ist in erster Linie ein Ionenspeicher und gibt dadurch dem Gewebe Festigkeit. Ähnliches gilt für das Keratosulfat. Die sulfatierten MPS sind ebenfalls osmotisch wirksam. Die Hauptaufgabe der MPS ist die des starken Wasserbindungsvermögens, welche die große Quellfähigkeit, die Elastizität und die Viskosität des Gallertkerns zur Folge hat.

Der Faserring besteht hingegen, wie schon der Name andeutet, hauptsächlich aus Fasern, die zusammengesetzt sind aus Bündeln kollagener Fibrillen. Sie ziehen zwiebelschalenförmig von einem Wirbelkörper zum anderen. Die Bestandteile des Kollagens sind Glycin, Prolin und Hydroxyprolin (Aminosäuren also). Zwischen den einzelnen Fasern befinden sich Streifen von kollagenem Maschenwerk, die einzelnen Fasern werden durch Verfilzungen und Verbindungen über diese wabigen Höhlen

hinweg zusammengehalten. Nach BUDDECKE (1964) soll dies eine Permeabilitätsgrenze sein und somit ein Hindernis für Stofftransport und Diffusion, welches als Kontrollsystem, besonders an der Grenze der Bandscheibe zur Umgebung, eingesetzt wird.

c) Biomechanik

aa) Die Bewegungen

Die intervertebralen Bewegungen werden durch die Zwischenwirbelscheiben übertragen, während die Wirbelbogengelenke die Bewegungsausschläge dirigieren und begrenzen.

Man kann verschiedene Stellungen von Gelenk und Bandscheibe unterscheiden:
In der Vorbeugung rutscht der Gallertkern nach hinten, und die Gelenkflächen der Wirbelbogengelenke divergieren.

Bei der Rückbeugung gleitet der Gallertkern nach vorne, während die Wirbelbogengelenke konvergieren.

Bei der Seitneigung gleitet der Gallertkern zur entlasteten Seite, und die Wirbelbogengelenke der belasteten Seite konvergieren, während die der entlasteten Seite divergieren. Die Bewegungen gestalten sich in ihrer Feinmechanik in den verschiedenen Abschnitten der Wirbelsäule sehr unterschiedlich. So ist z.B. auf Grund der sagittal gestellten Gelenkflächen im Bereich der Lendenwirbelsäule nur eine Vor- und Rückneigung möglich, Rotationen hingegen können nicht ausgeführt werden.

bb) Der Gallertkern

Die Elastizität der Wirbelsäule rührt in erster Linie her von dem Vermögen der Bandscheibe, in ihren Gallertkern Flüssigkeit aufzunehmen und zu anderer Zeit wieder abzugeben. Durch Druck werden die Volumenveränderungen

des Nucleus pulposus bewerkstelligt. Axialer Druck übertragt sich gleichmäßig auf die Deckplatten und den Anulus fibrosus, dessen Fasern dann auf Zug beansprucht werden. Belastet man die Bandscheibe ungleichmäßig, z.B. nur auf der linken Seite, so weicht der Gallertkern auf die unbelastete Seite aus, in diesem Fall wandert er nach rechts. Das gleiche geschieht bei Vor- und Rückneigung. PLAUE (1974)präzisiert dieses Phänomen und stellt fest, daß es bei einer asymmetrischen Kompression durch die Annäherung zweier Wirbelkorperendflächen an einer Seite zu einer ungleichmäßigen Spannungsverteilung innerhalb des Anulus fibrosus kommt: die Spannung sinkt an den Stellen, wo sich die beiden gegenüberliegenden Wirbelkörper näherkommen, der Gallertkern weicht zur gegenüberliegenden Seite aus und führt dort zu einer Auswölbung des Faserrings und dadurch zu einer Spannungserhöhung in den Fasern. SCHENK (1964) hingegen glaubt, daß durch die Vergrößerung des Abstandes zwischen den beiden Wirbelkorperdeckplatten an der unbelasteten Seite die Fasern des Anulus fibrosus gestreckt würden und so den Gallertkern zur belasteten Seite drückten. Dies sei möglich, da hier, an der komprimierten Seite, durch das Naherrucken der beiden Wirbelkörperendflächen der Faserring entspannt sei und dem Druck des Gallertkerns nachgeben könne. HORTON (1958) belastete symmetrisch die ganze Bandscheibe und beobachtete, daß sich der Zwischenwirbelraum abflachte und der Gallertkern elastisch vom Anulus fibrosus abgefangen wurde. Er nannte dies "Tennisnetz-Phänomen". Andere Autoren (HARTMANN 1970) stellten fest, daß die Anulus-fibrosus-Fasern durch den Druck des Gallertkerns in einer gewissen Ruhespannung gehalten werden, so daß ein bestimmter "Verstreckungsgrad" vorhanden sei, der den Fasern einen elastischen Spielraum schafft. Dieses sich so ergebende System aus Kern und Fasern ist erheblichen Druckbelastungen gewachsen.

cc) Die Druckverhältnisse

Die Druck- und Zugkräfte, die auf das unbelastete und belastete Bewegungssegment einwirken, sind von ganz erheblichem Ausmaß.

Schon beim stehenden Menschen wirkt auf eine Lenden-bandscheibe ein Druck von rund 15 kg/cm^2 im Nucleus pulposus ein, bei der Beugung nach vorne ein Druck von 58 kg/cm^2 und bei der Vorbeugung mit einem Gewicht von 100 kg in Händen ein Druck von 144 kg/cm^2 (HERBERT 1953). Wenn man dies auf die Größe des Nucleus pulposus umrechnet, so ergibt sich, daß hierbei ungefähr ein Druck von 1000 kg auf ihn einwirkt. NACHEMSON (1959) führte Druckmessungen an Bandscheibenpräparaten von Verstorbenen durch und fand eine Abnahme der Druckwerte mit steigendem Alter. Auch MÜNCHINGER (1964)beschäftigte sich mit diesen Vorgängen und besonders mit ihrer praktischen Anwendung. Er untersuchte Druckkräfte, die bei verschiedenen Arbeits- und Bewegungshaltungen auf die Bandscheibe einwirken. So zeigte er zum Beispiel, daß die Drucke auf die Zwischenwirbelscheibe beim Heben eines Gewichtes von 50 kg bei gebeugtem Rücken auf der belasteten Bandscheibenseite, also vorne, bis zu 500 kg betragen, was zu einer erheblichen Verformung der Bandscheibe führt. Hingegen bewirken die Drucke beim Heben des gleichen Gewichtes mit geradem Rücken und lediglich Rumpfbeugung mit einem Winkel von 45^o in der Mitte der Bandscheibe, also in der Nucleus-pulposus-Gegend, nur ein Gewicht von 400 kg. Dieses Gewicht kann sich zudem noch, da es genau den Bandscheibenmittelpunkt trifft, auf die ganze Bandscheibe verteilen, so daß die Möglichkeit zum eventuellen Prolaps noch wesentlich geringer wird.

Druck wird jedoch nicht nur beim Stehen oder Sitzen erreicht, sondern ist auch im Liegen, und zwar allein durch den Muskelzug, vorhanden. So konnte man schon bei entspannter Rückenlage an den unteren Lenden-Bandscheiben einen Druck von 15 kg messen. Hieraus ist auch zu

verstehen, daß die Blutgefäße und Nerven schon so früh atrophieren, wie oben (II. 1. c)) beschrieben, und es ist nicht erstaunlich, daß in einem so schlecht ernährten Gewebe schon frühzeitig Degenerationen eintreten. Die Theorie des Einflusses des Druckes auf diese Vorgänge wurde von diversen Autoren bestätigt (BRADFORD und SPURLING 1950, LINDEMANN und KUHLENDAHL 1953, u.a.).

3. Pathologie

a) Allgemeine Vorbemerkungen

Das Bandscheibengewebe kann verdrängt werden. Die Richtung, in die das Gewebe verdrängt wird, ist abhängig von der Richtung, aus der die Ursache kommt (z.B. ein verstärkter Druck). Verlagernd können allmählich fortschreitende Prozesse wirken, aber auch plötzliche Gewalteinwirkungen. Je nach dem Ort, wo das Bandscheibengewebe hingelangt, unterscheiden wir verschiedene Krankheitsbilder, die sich oft, aber nicht immer, im Röntgenbild darstellen lassen.

Wir sprechen bei einer Verlagerung von Bandscheibenmaterial nach oben oder unten, also in den nächstoberen bzw. nächstunteren Wirbelkörper, von den sogenannten "Schmorl-Knötchen". Außerdem kann das Gewebe aber auch nach vorne gedrängt werden, wodurch in der Folge das Krankheitsbild der "Spondylosis deformans" erzeugt wird. Eine Verlagerung nach hinten oder seitlich-hinten führt zu erheblichem Druck auf Nervenwurzel oder Rückenmark. Dieser letztgenannte Fall ist das, was man als den eigentlichen sogenannten Bandscheiben-Prolaps bezeichnet. Ein größerer Gewebeaustritt bewirkt fast regelmäßig eine Abnahme der Höhe des Zwischenwirbelraumes; dies kann röntgenologisch sichtbar gemacht werden. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, daß die Bandscheibe ihre Höhe trotzdem beibehält, entweder durch Aufquellung oder dadurch, daß der Verlust des Materials durch einsprossendes Bindegewebe ausgeglichen wird. Diese beiden Möglichkeiten treten allerdings recht selten ein.

b) Häufigkeiten

Die Häufigkeit des Auftretens von Bandscheibenschäden kann wirklich objektiv nur durch Operations- oder Leichenuntersuchungen festgestellt werden. Schon 1929 stellte ANDRAE Untersuchungen an 368 Wirbelsäulen an

und fand davon 56 mit einem Bandscheiben-Prolaps. Dies bedeutete umgerechnet auf die Gesamtbevölkerung einen Anteil von 15,2 %. Männer waren hierbei mit 11,5 % seltener betroffen als Frauen (18,7 %) - ein Ergebnis, das in genauem Gegensatz zu allen neueren Untersuchungen steht. In dieser Untersuchungsreihe traten keine Vorfälle vor dem 30. Lebensjahr auf. Schon KING jedoch konnte einen Prolaps bei einem dreijährigen Kind feststellen (zwischen 4. und 5. Lendenwirbelkörper). BRUNNENGRABER (1967) untersuchte 500 operierte Bandscheibenvorfälle in Altersabhängigkeit und fand folgende Werte:

10- bis 19-jährige Patienten	11	= 2,2 %
20- bis 29-jährige Patienten	59	= 11,2 %
30- bis 39-jährige Patienten	196	= 39,2 %
40- bis 49-jährige Patienten	145	= 29,0 %
50- bis 59-jährige Patienten	70	= 14,0 %
60- bis 70-jährige Patienten	15	= 3,0 %

In dieser Studie wurden 336 Männer und 164 Frauen erfaßt. Die Lokalisation der Prolapse gibt er folgendermaßen an:

L1/L2	=	1	= 0,2 %
L2/L3	=	7	= 1,4 %
L3/L4	=	14	= 2,9 %
L4/L5	=	226	= 48,0 %
L5/S1	=	220	= 47,2 %
S1/S2	=	2	= 0,4 %

Interessanterweise hatten 30 Patienten von ihrer Erkrankung nichts gewußt. Die neuesten diesbezüglichen Untersuchungen stammen von BRAUN (1969). Er prüfte 562 Prolapse und 38 Protrusionen nach und fand die Verteilung:

L3/L4	=	27	= 4,5 %
L4/L5	=	282	= 47,0 %
L5/S1	=	291	= 48,5 %.

Man kann zusammenfassend festhalten:

aa) Eine eindeutige Häufung der Bandscheibenvorfälle in der Lendenwirbelsäule

bb) Männer sind häufiger betroffen als Frauen (ungefähres Verhältnis: 2:1) (BRUNNEGRABER 1967)

cc) Innerhalb der Lendenwirbelsäule treten die Vorgänge häufiger an den unteren Segmenten auf

dd) Ein Gipfel der Erkrankungsbilder liegt im vierten bis fünften Lebensjahrzehnt.

c) Pathologisch-anatomische Erscheinungsformen

aa) Makroskopisch:

Wir müssen verschiedene Schweregrade der Verlagerung von Bandscheibenmaterial unterscheiden. Tritt der Fall ein, daß sich der Gallertkern innerhalb des Faserrings vorwölbt, ohne sich jedoch ganz durchzuschieben, so sprechen wir von einer Protrusion. Im Bereich der Lendenwirbelsäule werden dadurch Nerven an der Hinterwand des Wirbelkörpers betroffen und, je nach Stärke der Vorwölbung, gequetscht (Ramus recurrens). Dies dürfte eine wesentliche Ursache der Lumbago (Hexenschuß) sein. In dem Moment jedoch, in dem Gallertkerngewebe durch Riß- und Höhenbildungen hindurch vollständig nach hinten durchbricht, sprechen wir von einem echten Prolaps. Wir unterscheiden hier nochmals den "pendelnden" Prolaps, der bei bestimmten Bewegungen wieder zurückwandern kann, den"eingeklemmten" Vorfall, bei dem durch eine Einengung der Durchtrittsstelle die Rückkehr verwehrt wird, einen "fixierten" Vorfall, der durch Narbenstränge bereits befestigt ist, und einen "freien" Prolaps, der gar keine Verbindung mehr zum Zwischenwirbelraum hat und im Periduralraum liegt, in dem er auch möglicherweise nach oben oder unten wandern kann. Man spricht in diesem Fall regelrecht von einem "wandernden" Prolaps.

Wir finden selbstverständlich bei verschiedenen Arten von Wanderung unterschiedliche Schweregrade von klinischen Erscheinungsbildern. Durch einen pendelnden Prolaps beispielsweise könnte das nur zeitweise auftretende Schmerzgefühl mancher Patienten erklärt sein, aber auch die schon im Einleitungskapitel erwähnte Tatsache, daß wir starke Schmerzen haben können, die bei Untersuchungen zur Objektivierung keine erkennbare Ursache besitzen.

bb) Biochemische Veränderungen

Wie oben bereits angedeutet, enthält der Gallertkern in einem Gelzustand Makromoleküle vom Typ der löslichen Kollagene, Glycoproteide und MPS, die in einem Netzwerk miteinander verbunden sind.

Man hat festgestellt (DAVIDSON 1959), daß aus den löslichen MPS unlösliche werden, somit der Wassergehalt sinkt und der Stickstoffgehalt steigt. Es ist sogar möglich, daß der Nucleus pulposus ganz eintrocknet und dann der Faserring richtig zerrieben wird. Mit zunehmendem Alter kann man sehen, daß der MPS-Gehalt als Ganzes sinkt. Die Mucopolysaccharide bestehen aus Chondroitinsulfat und Keratosulfat. Der Gehalt an Keratosulfat nimmt relativ zu, an die Stelle des Chondroitinsulfats tritt jedoch das Dermatansulfat (KRÄMER 1973). Beide Stoffe haben ein niedrigeres Molekulargewicht; damit ist das Absinken der Viskosität gut erklärt. Genau diese Veränderungen lassen sich auch bei prolabierten Gallertkernen finden, obwohl diese Veränderungen dem dabei vorliegenden Alter nicht entsprechen. Gleichzeitig haben die Fibrillen eine Entwicklungsstufe ähnlich der der Neugeborenen - sowohl im Gallertkern wie auch im Anulus fibrosus. Durch die Depolymerisation könnte man die schmerzbereitenden Volumenschwankungen des Nucleus pulposus erklären. Durch den Zerfall befinden sich im Gallertkern zeitweilig zahlreiche kleine

Moleküle, die den kolloidosmotischen Druck ansteigen lassen und so vermehrt Wasser entziehen. Durch die veränderte Füllung des Gallertkerns kommt es zu einer Anspannung des Anulus fibrosus. Die Spaltprodukte werden jedoch normalerweise nach einer gewissen Zeit durch die semipermeablen Grenzschichten der Bandscheibe hinausdiffundieren.

Beim 25- bis 40-jährigen Patienten (KRÄMER 1973) - andere Autoren geben 30- bis 50-jährige Patienten an - fanden sich Bandscheiben, die erstaunlich viel Wasser zu speichern in der Lage waren. Der Quelldruck innerhalb des Gallertkerns kann also sehr hoch werden, wohingegen der Anulus fibrosus durch Zermürbung und Rißbildung in seiner Widerstandsfähigkeit stark geschwächt ist. Wenn sich der Quelldruck des Kerns und der elastische Widerstand des Faserrings nicht mehr die Waage halten können, dann kommt es zum Bandscheiben-Prolaps.

cc) Mikroskopische Veränderungen

Schon in einem Alter von 25 bis 40 Jahren zeigt sich der Beginn und Fortschreiten regressiver Strukturumwandlung in beginnender Dehydratation, schärferer Konturierung der Faserringlamellen und der Verwischung der Grenzen zwischen Faserring und Gallertkern, der nicht mehr so hell-glänzend, sondern mehr matt-degenerativ wird. Die Konsistenz der Bandscheibe wird fester durch Austrocknung. Der Gallertkern zeigt eine Verquellung der Grundsubstanz, eine Homogenisierung und die Zeichen des Kernzerfalls. Im Anulus fibrosus, dessen Lamellen im jugendlichen Alter ganz regelmäßig angeordnet sind, treten mit zunehmendem Alter Faserverwerfungen und Risse auf, die immer stärker werden. Wir können sogar gangartige Aushöhlungen erkennen. Im dorsalen Anteil kommt es zu radiären Einrissen, da hier durch die in frühester Kindheit atrophierten Blutgefäße

ein locus minoris resistentiae besteht. Die Zermürbungsprozesse steigern sich bis ins hohe Alter, wo wir fast regelmäßig große Risse und Spalten finden, Durchbrüche des Anulus fibrosus und Defekte, unter Umständen sogar mit Gewebeverlagerung, bis hin zu einer völligen Strukturauflösung. Diese Vorgänge müssen angesehen werden als Folge funktionsmechanischer Beanspruchung und werden deshalb von LINDEMANN (1953) als "Zermürbung" bezeichnet, welche im Gegensatz steht zur "Degeneration", die eine Form von Stoffwechselstörung darstellt.

d) Ursachen

Alle Versuche, die Gründe für die Entstehung von lumbalen Bandscheibenvorfällen anzugeben und somit eine Basis für eine wirksame Prophylaxe zu schaffen, zielen im wesentlichen ab auf die Frage: Ist die Erkrankung kongenital bedingt, oder müssen exogene Faktoren als Ursache angesehen werden?

Ohne Zweifel gibt es einen Konstitutionsfaktor für die Verletzbarkeit und Veränderbarkeit des Bandscheibengewebes. LUSCHKA (1856) und LINDEMANN (1953) nennen dies "Disposition zur Veränderung in Form von radiären Rissen" (z.B. des hinteren Diskusanteils). Die Bedeutung des kongenitalen Faktors kommt darin zum Ausdruck, daß bei gewissen Rassen, wie z.B. den Asiaten, kaum Vorfälle bekannt sind. BRAUN (1969) führt dies auf die geringere Größe zurück, und er weist ebenso nach, daß auch Frauen häufiger betroffen sind, wenn sie eine größere Statur haben. Auch ist eine Geschlechtsdisposition erwiesen insofern, als aus Operationsberichten bekannt ist (BRUNNENGRABER 1967), daß Männer etwa doppelt so häufig erkranken wie Frauen. Diese "anlagebedingten Faktoren" (GRAFF 1952) würden aber allein nicht ausreichen, wenn nicht ein Trauma den endgültigen Vorgang des Bandscheibenvorfalls initiieren würde. Als Trauma kann in diesem Falle gelten: Plötzliche, ruckartige Bewegungen, direkte Gewalteinwirkungen, aber auch

chronische Belastung, wie z.B. Motorisierungsbelastung, Schwerarbeit etc., welche durch eine zunächst unbemerkte Schädigung der Zwischenwirbelscheibe einen langsamen Zerstörungsprozeß in Gang setzen, der erst nach jahrelangem Verlauf zum voll ausgebildeten Krankheitsbild führen kann. Früher nahm man an, es sei lediglich der aufrechte Gang des Menschen, der die Veränderungen bewirkte. Man dachte, daß die Schwerkraft in Druck und Kompression umgesetzt werde und so eine ständige Dauerbelastung für die Bandscheibe darstelle. Dies wird heute aber stark bezweifelt, und man nimmt an, daß der gewebliche Untergang zurückzuführen ist auf die ständigen, bei Bewegungen auftretenden Kräfte von Spannungen und Torsion, die durch Drehung und Zerrung bei der Bewegung entstehen.

III. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

1. Versuchsmethode

a) Vorbemerkung

Wir haben bei unseren Versuchen Bandscheibenpräparate kürzlich verstorbener Menschen untersucht. Diese In-vitro-Versuche besitzen selbstverständlich nur eine beschränkte Aussagefähigkeit. Die In-vivo-in-vitro-Differenz wird jedoch relativ klein gehalten. Dazu tragen bei:

1) Die Bradytrophie des Bandscheibengewebes,
2) die Präparation und Verwertung für unsere Versuche wenige Stunden nach Todeseintritt und
3) die Lagerung der Präparate in Ringer-Lösung, die mit Totocillin versetzt wurde.

b) Das Präparat (Stahl/Vogel)

Die im Gerichtsmedizinischen Institut der Universität Düsseldorf entnommenen Lenden- (bzw.Hals-)Wirbelsäulen wurden von uns, nach Abtrennung von Wirbelbögen, Rükkenmark und paravertebralem Gewebe (bis auf das vordere und hintere Längsband), in Wirbelkörpermitte horizontal durchtrennt. Wir erhielten für unsere Versuche Präparate, die aus je zwei halben Wirbelkörpern mit der dazwischenliegenden Bandscheibe bestanden. Es wurden nur die Präparate verwendet, an denen weder Wirbel- noch Bandscheibenerkrankungen vorlagen und der Anulus fibrosus äußerlich intakt war.

Wir schoben nunmehr durch eine dünne Lumbalnadel von vorne einen 1 mm langen Metallsplint in das Zentrum der Bandscheibe vor. Dieser Splint konnte (s.Fotos) in seiner Position relativ genau hinsichtlich Bandscheibentiefe und -breite festgelegt werden. Hinsichtlich der Bandscheibenhöhe waren wir, vor allem bei der Halswirbelsäule mit ihrer unterschiedlichen Bandscheibenhöhe vorne, hinten und in der Mitte, mehr oder we-

niger dem Zufall überlassen. Dies hatte jedoch keine besonders schwerwiegenden Auswirkungen, da, wie anatomisch bewiesen, das zentrale mobile Gewebe nach oben und unten jeweils bis fast an die Knorpelplatte heranreicht (im Gegensatz zur seitlichen Ausdehnung).

Die Lokalisation des Splints wurde so bewerkstelligt, daß wir an der Fläche des oberen Wirbelkörpers die Lumbalnadel anlegten und die Einstichtiefe mit einem verschiebbaren Faden, der um die Nadel geknotet war. definierten. Daraufhin stachen wir die Lumbalnadel bis zum Fadenknoten in die Bandscheibe ein und entluden sie. Diese grobe Methode ließ natürlich keine auf den Millimeter genaue Positionsfestlegung des Splints in den räumlichen Achsen (x/y) der Bandscheibe zu. Es trat also eine gewisse Streuung ein.

Die Lage der Metallnadel (Koordinatenbestimmung) kontrollierten wir durch Röntgenaufnahmen in zwei Ebenen. Bei ungünstiger Position, z.B. in Nähe der Knorpelplatten, schoben wir einen zweiten Splint in die Bandscheibe nach.

Abb. 1:

<u>Lokalisation der Metallnadel:</u>

Die mit dem Splint gefüllte Lumbalnadel wird an der Fläche des zur Bandscheibe nächstoberen Wirbelkörpers angelegt und die Einstichtiefe durch den verschiebbaren Faden bestimmt. (Demonstration an einem Halswirbelsäulenpräparat).

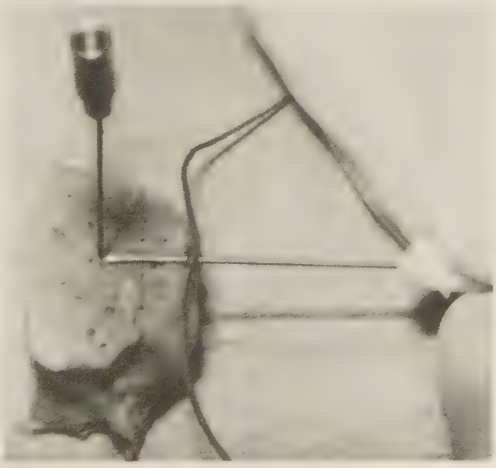


Abb. 2:

Die Lumbalnadel wird bis zum Faden eingestochen und entladen. (Demonstration an einem Halswirbelsäulenpräparat)

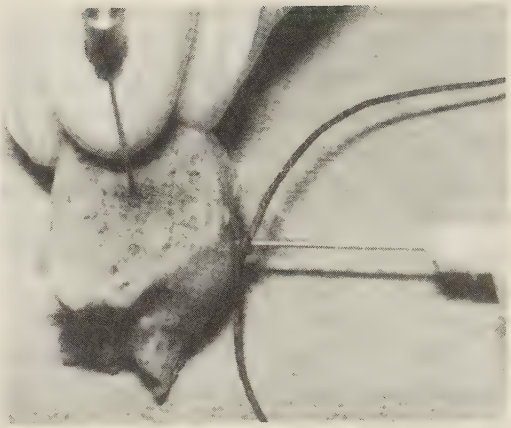
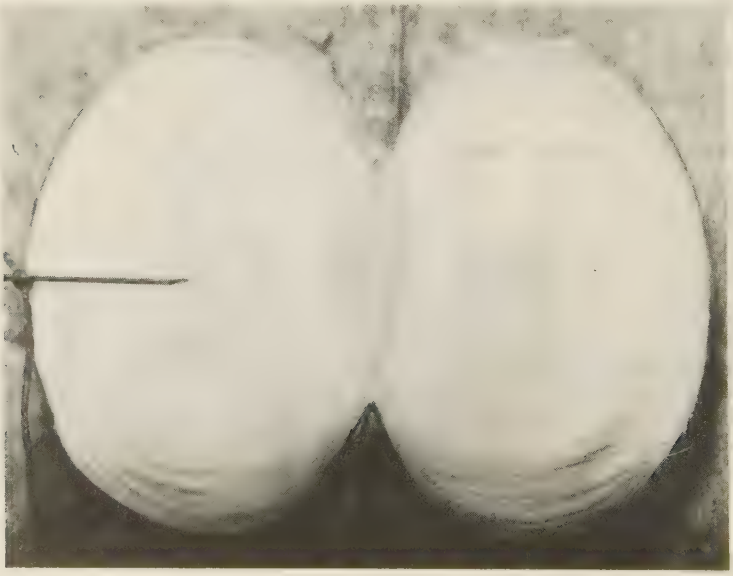


Abb. 3:

Kontrolle der Lage der Metallstücke nach Aufschneiden einer Bandscheibe: die Splinte liegen im zentralen mobilen Gewebe.
(Lendenwirbelsäule, Segment: L3/L4.)



Der von KRÄMER entwickelte Rahmen (s.auch Fotos) diente zur Druckbelastung der so gewonnenen Präparate. Zwischen Rahmen und Wirbelkörperoberfläche setzten wir 4 mm starke Messingplatten, die der Größe nach so bemessen waren, daß sie zur Halbseitenbelastung dienten, d.h. sie bedeckten flächenmäßig die Hälfte des oberen bzw. unteren Wirbelkörperanteils. Die Größe der Platten wurde deshalb so gewählt, um frühzeitige Impressionsfrakturen an den Wirbelkörpern zu vermeiden, die bei Druck auf eine kleine Fläche vorkommen können. Außerdem hatten wir bei Vorversuchen mit kleineren Platten ihr Abrutschen von den Wirbelkörpern nach Belastung feststellen müssen.

Abb. 4: Asymmetrische Belastung der Seitenkante einer Lenden-Bandscheibe: Die 4 mm dicken Metallplatten, die sich zwischen Wirbelkörper und Druckrahmen befinden, bedecken die Hälfte des oberen bzw. unteren Wirbelkörperanteils.

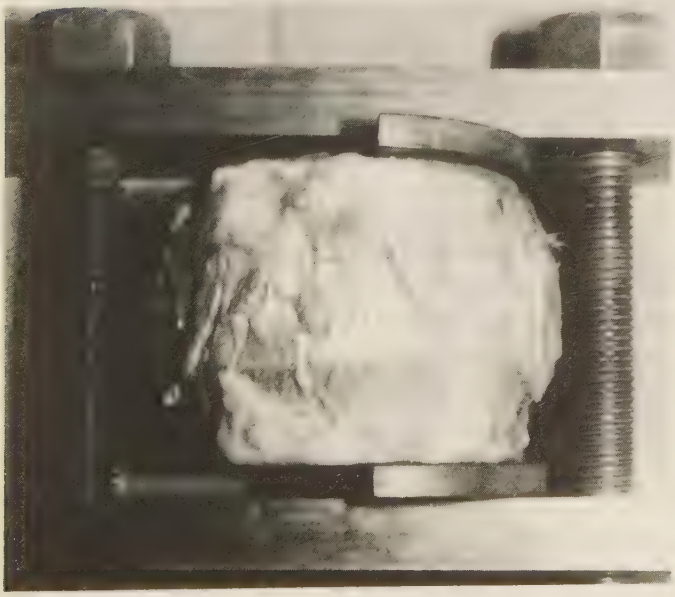
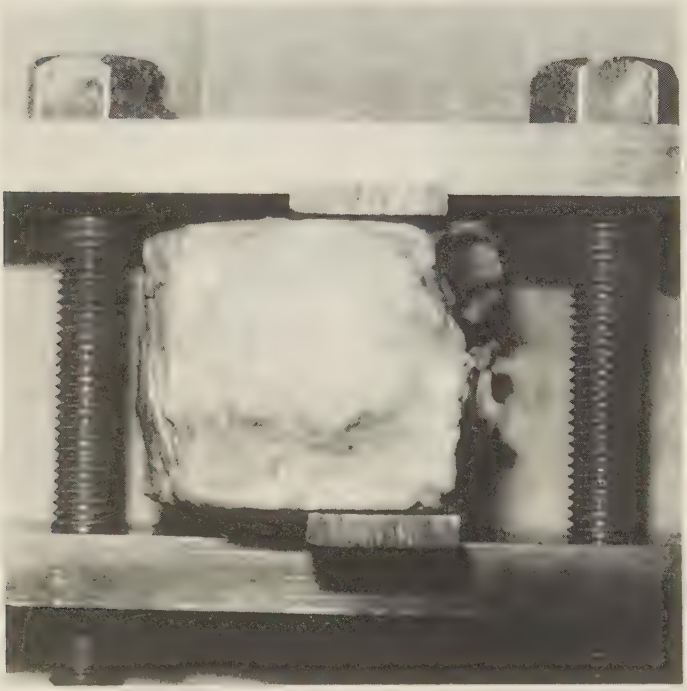


Abb. 5: Asymmetrische Belastung der Hinterkante einer Lenden-Bandscheibe.



Zur Einstellung exakter Belastungen verwendeten wir einen Drehmomentschlüssel, der wiederholt mit einer Kraftmeßeinrichtung (KRÄMER 1973) geeicht wurde. Da der Kompressionsdruck rasch nachließ, mußte er regelmäßig nachgestellt werden.

Die Präparate wurden mit Rahmen in Ringer-Lösung gelegt, aus der wir sie nur für die Röntgenaufnahmen herausnahmen.

Die Wirbelkörper-Bandscheiben-Wirbelkörperpräparate mit ihren implantierten Metallnadeln benötigten im Rahmen einen Fixationsdruck von ca. 10 kp. Diesen Ausgangszustand bezeichneten wir als "ohne Belastung" (o.B.).

Das Präparat wurde jeweils unter konstanten Bedingungen geröntgt. Dazu gehören: Ein immer gleicher Film, eine stets gleiche Belichtung (20 mAs, 45 kv) und ein konstanter Film-Focus-Abstand. Dazu muß vermerkt werden, daß dieser Abstand 110 cm, der Abstand vom Film zum Objektmittelpunkt jedoch 14 cm betrug (das Präparat wurde jeweils auf die gleiche Erhöhung gelegt, um dieselben Bedingungen für alle Versuche zu schaffen), so daß die Entfernung vom Focus zum Objekt 96 cm betrug. Hieraus ergab sich jeweils eine Vergrößerung von 14 %, d.h. alle Röntgenbilder sind um 14 % größer als die realen Präparate. Somit ist also auch die später gemessene Wanderung um 14 % größer als in Wirklichkeit. An der Halswirbelsäule wurden nach 3 min. (Belastung mit 50 kp.), weiteren 3 min. (mit Belastungserhöhung auf 100 kp.) und nach 60 min. (mit 100 kp.) erneut Röntgenaufnahmen angefertigt. Es wurde die Lendenwirbelsäule nach 3 min., nach 60 min., nach 24 Std. und in einigen Fällen auch nach 48 Std. mit 200 kp. schwerer Belastung geröntgt. Hierzu ist noch anzumerken, daß es aus technischen Gründen nicht möglich war, die Belastungsveränderungen in kürzerer als drei-minütiger Zeitspanne röntgenologisch zu erfassen. Es wurde daher die 3 min. andauernde Belastung der Bandscheibe gleichgesetzt mit einer sehr kurzdauernden, fast ruckartigen Bewegung. Die Auswertung bestand darin, die Lage des Metallsplints innerhalb der Bandscheibe nach der jeweiligen Zeitmarke und Belastung bzw. Belastungsart (Vor-, Rück-, Seit-Neigung) zu bestimmen. Die einzelnen Segmente unterzogen wir immer der gleichen Belastungsart (z.B. L4/5 der Dorsalflexion). So konnte eine Wanderung des Splints festgestellt werden (zur Aussagekraft s. Vorversuche).

Nach Versuchsende fertigten wir von allen Präparaten Frontal- bzw. Horizontalschnitte an, um den makro-

skopischen Befund der Bandscheiben zu dokumentieren. Zusammenfassend sei noch einmal der Arbeitsgang in seiner zeitlichen Abfolge beschrieben:

aa) Herstellung des Wirbelkörper-Bandscheiben-Wirbelkörper-Präparates
bb) Implantation des Metallsplintes
cc) Röntgenaufnahme in zwei Ebenen zur Koordinatenbestimmung (bei ungünstiger Lage: Nachschieben eines neuen Splints)
dd) Fixation im Belastungsrahmen
ee) Röntgenaufnahme vor der eigentlichen Belastung
ff) Röntgenaufnahme nach Belastung und
gg) Anfertigung von Frontal- bzw. Horizontalschnitten zur makroskopischen Untersuchung der Bandscheiben.

c) Das verwendete Untersuchungsmaterial

aa) Die Segmentverteilung

Für gleiche Belastungsarten wurden bei den Präparaten stets die gleichen Segmente gebraucht, damit man auf diese Weise vergleichbare Versuchsbedingungen voraussetzen konnte. Das Segment L5/S1 konnte aus technischen Gründen nicht verwertet werden, da hierbei keine planparallelen Deck- und Bodenplatten vorliegen. Für den Versuch der Belastung der hinteren Hälften der Bandscheiben, entsprechend einer Rückwärtsbeugung unter der Bewegung, wurde regelmäßig das Segment L4/L5 genommen. Die seitliche Belastung, entsprechend einer Skoliosierung in vivo, wurde stets am Segment L3/L4 durchgeführt und die Belastung der vorderen Hälfte der Bandscheibe, entsprechend der Beugung nach vorne, fand immer am Segment L2/L3 statt. Nur so konnten vergleichbare Bedingungen gewährleistet sein. Die Segmente L1/L2 und Th12/L1 wurden nicht verwandt; bei

ihnen ist die klinische Relevanz nicht in dem Maße vorhanden wie bei den unteren Lenden-Bandscheiben (s. auch die prozentuale Verteilung der operativ entdeckten Bandscheibenvorfälle).

bb) Kriterien der zur Verwendung kommenden Präparate.

Es wird eine Zusammenstellung vorgenommen, welche die Todesursachen und die röntgenologischen Veränderungen bei den einzelnen Präparaten behandelt und gleichzeitig eine Beziehung zum Alter vorsieht. In die Auswertung werden Präparate von Verstorbenen mit folgendem Alter einbezogen: 18, 25, 32, 36, 38, 42, 62 und 77 Jahre. Die Todesursachen waren recht unterschiedlich, z.B. Stromunfall, Drogen- und Alkoholmißbrauch, Verblutung, Schlafmittelvergiftung, Brand, Lungenembolie, Herzbeuteltamponade und CO-Vergiftung. In jedem Fall sind dies also Todesursachen, die keine Beeinträchtigungen der Wirbelsäule hervorrufen können. Dementsprechend finden wir im Röntgenbild auch lediglich die altersentsprechenden Degenerationen. So beobachten wir erst vom Alter von 42 Jahren an röntgenologisch faßbare Veränderungen: Randwulstbildung, Verkalkung im Bandscheibenbereich, leichte bis mittelschwere Protrusionen der Bandscheiben. Im späteren Alter sind dann knöcherne Vorwölbungen (Spondylophyten), stärkere Verknöcherungen - nicht nur in den Längsbändern, sondern auch im Zwischenwirbelscheibenbereich - zu sehen.

Zusammenfassend kann man also sagen: Es standen uns Bandscheibenpräparate zur Verfügung, die nicht primär pathologisch verändert, sondern lediglich altersentsprechend entwickelt und degeneriert waren.

cc) Die Altersklassen

Es werden die einzelnen Versuche und Altersgruppen

zusammengefaßt, so daß man dadurch eine sinnvolle Aussage über Unterschiede treffen kann. Es liegt aufgrund der Altersverteilung der uns vorliegenden Präparate nahe, die Gruppen wie folgt zu definieren:

Gruppe A: 18- bis 25-jährige Versuchspersonen
Gruppe B: 32- bis 42-jährige Versuchspersonen
Gruppe C: 62- bis 77-jährige Versuchspersonen.

Über die dazwischenliegenden Altersstufen kann keine Aussage getroffen werden, da hierzu keine Präparate zugänglich waren. Die von vornherein getroffene Einteilung erweist sich später auch als richtig, da es innerhalb dieser Gruppen bei den einzelnen Belastungsversuchen große Übereinstimmungen gibt.

d) Die Ausmessung.

aa) Koordinatenbestimmung

Die Ausmessung der für die Auswertung der Ergebnisse wichtigen Daten erfolgt in allen Fällen am Röntgenbild. Es wird zunächst die Wirbelkörperbreite bzw. Wirbelkörpertiefe bei allen Belastungsversuchen bzw. ihren Kontrollaufnahmen bestimmt und abgemessen, und zwar jeweils für die beiden einer Bandscheibe anliegenden Wirbelkörper an ihrer breitesten Stelle. Die beiden Punkte, die diese Strecken in zwei gleiche Hälften teilen, werden durch eine Gerade miteinander verbunden, auf welcher dann wiederum der Mittelpunkt abgemessen und eingezeichnet wird. Dieser Punkt bezeichnet den O-Wert oder Mittelpunkt eines Koordinatensystems, das hier angelegt wird und in dem die Lage der Metallnadeln ermittelt werden soll. Es wird definiert, daß positive Koordinaten (+x/+y) die Bezeichnungen für Punkte seien, die sich, x-achsial gemessen, oberhalb der x-Achse befänden. Das heißt: (-x/-y) sei die Bezeichnung für einen Punkt, der sich auf der Belastungsseite und unterhalb der x-Achse

befände. X- und y-Werte werden jeweils in mm angegeben. Mit diesem System läßt sich die Lage einer jeden Metallnadel im Bandscheibeninnenraum bestimmen. Dies ist bedeutsam, denn es können zur Auswertung nur die Versuche kommen, bei denen die Nadel nachweislich im zentralen mobilen Gewebe liegt.

bb) Das zentrale mobile Gewebe.

Um nun auch wirklich die Begrenzung des zentralen Nucleus-pulposus-Gewebes zu erfassen, werden zu jedem Versuch Röntgenaufnahmen in zwei verschiedenen Ebenen vorgenommen, d.h. jeweils eine von vorne und eine von der Seite. Bei beiden Aufnahmearten werden die oben (Abschnitt "Koordinatenbestimmung") angegebenen Ausmessungen vorgenommen und die Begrenzung des zentralen mobilen Gewebes in drei Ebenen bestimmt. Vom Mittelpunkt des dreidimensionalen Koordinatensystems aus werden die Grenzen, mit denen sämtliches Gallertkerngewebe erfaßt wird, angegeben, nämlich

- jeweils zur oberen und unteren Bandscheibenkante 1/4 der gesamten Bandscheibenhöhe, insgesamt also die Hälfte der Bandscheibenhöhe,
- in der Breite zu beiden Seiten jedesmal 1/4 der Gesamtbreite,
- in der Tiefe nach vorne und nach hinten zu jeweils 1/4 der Gesamttiefe der Bandscheibe.

Diese Begrenzungen sind sinnvoll, da durch Aufschneiden der Präparate festgestellt wurde, daß in jedem Fall das Nucleus-pulposus-Gewebe nicht kleiner als dieser Umkreis war, so daß jeder Metallsplint, der in diesem Bezirk lag, sich auf jeden Fall innerhalb des zentralen mobilen Gewebes befand. Der Bezug zur Bandscheibengesamtbreite ist gerechtfertigt, da mit der Verbreiterung der Zwischenwirbelscheibe (bzw. Vergrößerung der Tiefe oder Höhe) im allgemeinen auch die Größe des Gallertkerns anwächst.

cc) Bandscheibenbreite, Bandscheibentiefe.

Noch nicht erwähnt wurde die Bestimmung von Breite und Tiefe der Zwischenwirbelscheibe. Hierbei geht man definitionsmäßig aus vom Mittelpunkt des Koordinatensystems, verbindet diesen Punkt beidseitig mit den jeweils breitesten Stellen der Bandscheibe (im Röntgenbild als Schatten deutlich zu erkennen) und mißt die Länge dieser Geraden aus. Breite und Tiefe der Zwischenwirbelscheibe sind für die Umgrenzung des zentralen mobilen Gewebes und außerdem für die Berechnung der relativen Wanderung der Metallnadel bedeutsam.

dd) Die Wanderung der Metallnadel.

Wenn wir, wie oben beschrieben, die Lage der Metallnadel innerhalb des Koordinatensystems bestimmt haben, so fällen wir von hier aus das Lot auf die Verbindungslinie zwischen den beiden Wirbelkörpern und messen die Entfernung zu dieser Geraden aus. So erhalten wir z.B. im Versuch 7C (experimentelle Rückneigung bei einer 25-jährigen Patientin) nach 3 min. eine Entfernung vom Ausgangspunkt von 2 mm. Das gleiche wird nach 1 Std. (3 mm) und nach 24 Std. (nicht weitergewandert) und nach 48 Std. (immer noch gleiche Lage) vollzogen. Die jeweils ermittelten Längenangaben werden in einer Tabelle festgehalten.

ee) Die Prozentangaben.

Es muß noch vermerkt werden, daß es nicht sinnvoll ist, die ursprünglich als Längenangaben in mm ermittelten Werte der Wanderung der Metallnadeln als solche miteinander zu vergleichen. Innerhalb der Altersgruppen variieren die Bandscheibenbreiten und Bandscheibentiefen sehr stark, und infolgedessen zeigt auch die Größe des Gallertkerngewebes erhebliche Unterschiede, wodurch die Möglichkeit zur Lageverände-

rung dieser Struktur außerordentlich differieren kann. Wir halten es daher für notwendig, die gemessenen Wanderungswerte der Metallsplinte in eine Beziehung zu setzen zur jeweils für jedes Segment unterschiedlichen Zwischenwirbelscheibentiefe und Bandscheibenbreite und drücken die mm-Angaben aus als Prozentwerte des Bandscheibenumfangs. Nur so können wir die einzelnen Wanderungsstrecken miteinander vergleichen.

2. Vorversuche.

a) Kontrastmittelinjektion.

Es wurden die Bewegungssegmente zunächst, wie im Abschnitt "Versuchsmethode" beschrieben, präpariert und dann in das zentrale mobile Gewebe ein Röntgen-Kontrastmittel (Pantopaque) injiziert. Hierdurch konnte man den Nucleus pulposus in seiner ganzen Ausdehnung zwar momentan sehr gut darstellen, aber es war nicht möglich, einen Belastungsversuch durchzuführen, da das Kontrastmittel sehr schnell zentrifugal in die Umgebung diffundierte und dadurch die Ausdehnung des Gallertkerns nicht mehr genau abzugrenzen war. Noch weniger hätte man eine quantitative Auswertung der bei der Belastung auftretenden Wanderung vornehmen können, so daß aus allen diesen Gründen dieses Verfahren für unbrauchbar für unsere Versuchsreihe erklärt wurde. Wir kamen auf die sehr viel bessere Methode der Splintwanderung.

b) Der Bezugspunkt.

Bei der Methode der Wanderung der nahezu punktförmigen Metallnadel sollten nun verwertbare und vergleichbare Abmessungen erfolgen können. Die Präparate mußten zwischen den einzelnen Röntgenaufnahmen jeweils gewechselt, in Lösung gelegt und erneut auf die festgesetzte Belastung von 200 kp. gebracht werden. Zu diesem Zweck wurden sie immer wieder bewegt und in ihrer Beziehung zur Röntgenplatte verändert. Damit nun nicht falsche Werte durch Lageveränderung zustande kamen, wurde ein Bezugspunkt geschaffen. Als solchen wählten wir einen länglichen Metallsplint, der in der Senkrechten genau über den Einstichkanal für den Gallertkernsplint, in der waagerechten Ebene jedoch genau auf die Hälfte der Wirbelkörperbreite in den Wirbelkörperknochen versenkt wurde. Nun konnte

man in der Röntgenaufnahme an dem gleichen Aussehen der Metallnadel vor und nach einer Aktion eine gleiche Projektion und somit einen gleichmäßigen Durchgang des Röntgenstrahls ableiten und nur so überhaupt verwertbare Verschiebungen des Splints im zentralen mobilen Gewebe feststellen und abmessen.

c) Die möglichen Lagen der Metallnadel.

Die Lage des Metallsplints wurde vor Belastung (durch Röntgenaufnahme) und nach Belastung (durch Röntgenaufnahme und an aufgeschnittenen Präparaten) kontrolliert.

aa) Nicht verwertbare Möglichkeiten der Lage.

Bei zu weit nach oben, unten oder seitlich erfolgter Lagerung des Splints kann keine Aussage getroffen werden, da keine Wanderung des zentralen mobilen Gewebes stattfand. Der Gallertkern grenzt nach cranial und caudal zwar nur mit einer sehr dünnen Faserring-Grenzschicht an die Knorpelplatte, doch konnte es besonders bei leicht knöchern veränderten Bandscheiben schnell geschehen, daß man mit der Lumbalnadel infolge von Hindernissen vom geraden Weg abglitt und der Splint zu weit nach oben oder unten rutschte. Die Röntgenaufnahme zeigte regelmäßig keine Lageveränderung nach einer Belastung. Es wurde daher in einem solchen Falle nach der Röntgenkontrolle mit dem Ergebnis eines zu hoch sitzenden Splints entweder ein neuer Splint nachgeschoben oder, falls dies nicht möglich war, das Präparat verworfen. War die Lagerung der Metallnadel zu weit nach vorne, zu weit nach hinten oder zu weit nach seitlich geraten, so war ebenfalls keine Auswertung möglich, da es sich in diesem Fall lediglich um eine Verschiebung innerhalb des elastisch verzogenen Anulus fibrosus gehandelt hätte.

Auf die Sicherheitsbegrenzung des zentralen mobilen Gewebes wurde weiter oben bereits eingegangen.

bb) Verwertbare Möglichkeiten der Splintlagen (LINDEMANN, KUHLENDAHL 1953).

Der Splint liegt direkt im Gallertkern und ist allseitig dich umgeben von Kerngewebe, so daß er seine Lage bei einer auf einer Seite erfolgenden Belastung zusammen mit diesem Umgebungsverband verschiebt, oder die Nadel liegt in einer fixierten Höhle und verändert ihre Lage bei einer asymmetrischen Belastung lediglich innerhalb dieser Höhle, ohne dabei eine größere Strecke zurücklegen zu können, oder der Metallsplint ist umgeben von derben Faserzügen, die sich bei einer Verschiebung als Ganzes ausbuchten und somit den Splint in ihrem Innern mit sich nehmen.

d) Die Aufgaben der Metallnadel.

Als Ganzes wird die Lageveränderung des Splints in unseren Versuchen stellvertretend für die Bewegungen des zentralen mobilen Gewebes betrachtet, da diese direkt nicht nachzuweisen sind. Die Möglichkeit, daß die Metallnadel sich selbständig durch das liegenbleibende Umgebungsgewebe bohrt, konnte mittels Röntgenaufnahmen widerlegt werden. An horizontal durchgeschnittenen Bandscheiben, in die zuvor in das Gallertkerngewebe ein Metallsplint eingesetzt worden war, wurde der zentral bewegliche Teil mit Sonden zu verschiedenen Seiten und unterschiedlich stark verschoben, wobei der Splint aber nie isoliert durch das Gewebe wanderte, sondern stets im Gewebeverband. Damit wäre ausgesagt, daß die Methode der Splintwanderung als stellvertretend für die Wanderung des Nucleus pulposus betrachtet werden kann.

IV) ERGEBNISSE

1. Die "Rückneigung"

Ausgewertet werden 14 Untersuchungen, bei denen auf die oben (Abschnitt III) 1. b)) beschriebene Weise eine Belastung des hinteren Teils der Bandscheibe (entsprechend einer Rückneigung in vivo) durchgeführt worden war. Die Wanderung der Metallnadel als Ausdruck der Wanderung des zentralen mobilen Gewebes wird zu drei verschiedenen Zeitpunkten aus der Röntgenaufnahme ermittelt:

a) nach 3-minütiger Belastung,
b) nach 1-stündiger Belastung,
c) nach 24-stündiger Belastung,
d) außerdem wurde in fast allen Fällen zur Kontrolle auch nach 48 Std. dauernder Belastung noch einmal nachgemessen.

Die sich auf diese Weise ergebenden Werte zeigt die Tabelle 1 an:

Tab. 1:
Lordoseförmige Belastung von Lendenbandscheiben (L4/5): Wanderungsstrecke der Metallnadel im zentralen mobilen Gewebe in mm.

Alter	3min.	1Std.	24Std.	48Std.	Nr.
18	1,0	2,0	2,0	2,0	1A
25	0,5	1,0	1,5	1,5	2A
25	0,5	0,5	0,5	0,5	3A
25	2,0	3,0	3,0	3,0	4A
32	2,0	3,0	3,0	-	5A
32	4,0	4,5	4,5	4,5	6A
36	2,0	2,0	2,5	2,5	7A
36	1,0	1,0	1,0	1,0	8A
38	2,0	3,0	3,0	3,0	9A
42	2,0	3,0	3,0	3,0	10A
62	1,0	1,0	1,0	1,0	11A
77	1,0	1,0	1,0	1,0	12A
77	0,5	1,5	1,5	1,5	13A
77	0,5	1,5	1,5	1,5	14A

Diese Werte sind Längenwerte, d.h. sie bezeichnen die aktuelle Wanderung der Metallnadel in mm. Es wurde

oben (Abschnitt "Prozentangaben") schon darauf hingewiesen, daß es nicht ausreicht, die Längenmaße in dieser Form zu betrachten, sondern daß es notwendig ist, sie in Beziehung zu setzen zu der jeweils unterschiedlichen Tiefe der Zwischenwirbelscheiben. Man drückt die Wanderung des Splints aus als Prozentwert der Bandscheibentiefe. Ist die Metallnadel zu einem bestimmten Zeitpunkt z.B. 1 mm vom Ausgangspunkt entfernt und beträgt die Bandscheibentiefe 51 mm, so würde die Wanderung 1,96 % betragen. Nur so kann man von einer relativen Vergleichbarkeit sprechen, da innerhalb der Altersgruppen die Bandscheibentiefen stark variieren und infolgedessen natürlich auch die Größe des Gallertkerngewebes und damit die Möglichkeit einer Lageveränderung dieser Struktur.

Diese so korrigierten Werte zeigt die Tabelle 2 an:

Tab. 2:

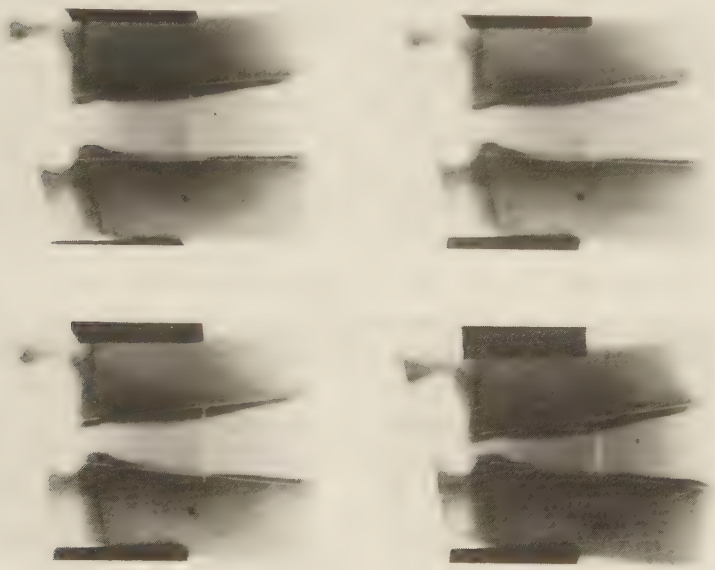
Belastung der hinteren Hälfte der Bandscheiben: Die Wanderungsstrecke der Metallnadeln (in mm) wird in Beziehung gesetzt zur jeweiligen Bandscheibentiefe. Es ergeben sich Prozentwerte.

Alter	3min.	1Std.	24Std.	48Std.	Nr.
18	1,96	3,92	3,92	3,92	1A
25	1,02	2,04	3,06	3,06	2A
25	1,13	1,13	1,13	1,13	3A
25	4,54	6,81	6,81	6,81	4A
32	5,0	7,5	7,5	-	5A
32	10,25	11,53	11,53	11,53	6A
36	4,87	4,87	6,09	6,09	7A
36	2,43	2,43	2,43	2,43	8A
38	4,0	6,0	6,0	6,0	9A
42	5,26	7,89	7,89	7,89	10A
62	2,0	2,0	2,0	2,0	11A
77	1,92	1,92	1,92	1,92	12A
77	0,96	2,88	2,88	2,88	13A
77	0,96	2,88	2,88	2,88	14A

Wir greifen eine typische Wanderungskurve heraus und erläutern das oben Gesagte anhand dieses Beispiels (38-jähriger Patient, Tod durch Alkoholabusus):

Abb. 6:

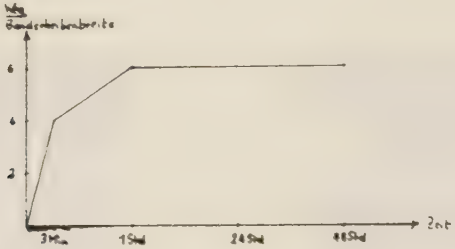
Belastung der hinteren Hälfte eines Bewegungssegments (38-jähriger Patient, Segment L5/L4, Gewicht 200 kp.):
a) ohne Belastung
b) Wanderung der Metallnadel nach 3-minutiger Belastung
c) Wanderung nach 1-stündiger Belastung
d) Wanderung nach 24 Stunden.



Die Entfernung der Metallnadel im zentralen mobilen Gewebe vom Ausgangspunkt beträgt nach 3 min. 2 mm, nach 1 Std. 3 mm, nach 24 Std. 3 mm und nach 48 Std. immer noch 3 mm. Die Bandscheibentiefe umfaßt 50 mm. Daraus ergibt sich, daß die prozentuale Fortbewegung vom Bezugspunkt nach 3 min. 4 %, nach 1 Std. 6 %, nach 24 und 48 Std. immer noch 6 % beträgt. Die zeichnerische Darstellung können wir aus der Abbildung 7 entnehmen.

Abb. 7:

Lordoseförmige Belastung einer Lendenbandscheibe (L4/L5): Wanderung der Metallnadel bei einem 38-jährigen Patienten (zu Abb. 6). Die Wanderungsstrecke (in mm) ist in Beziehung gesetzt worden zur Bandscheibentiefe des Segments.



Aus der Abb. 7 läßt sich folgendes ersehen:

a) Der stärkste Anstieg erfolgt bereits nach 3 min. Drückt man den gemessenen Wert mathematisch aus, also als: Geschwindigkeit = $\frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}}$, so beträgt in diesem Fall die Wanderungsgeschwindigkeit:
in den ersten 3 min. 0,6 $\frac{\text{mm}}{\text{min.}}$ bzw. 1,3 $\frac{\%}{\text{min.}}$,
nach 1 Std. 0,0175 $\frac{\text{mm}}{\text{min.}}$ bzw. 0,035 $\frac{\%}{\text{min}}$.
Das bedeutet: Die Wanderungsgeschwindigkeit der Metallnadel resp. des zentralen mobilen Gewebes ist am größten in den anfänglichen 3 min. nach der Belastung, die spätere Geschwindigkeit ist relativ unbedeutend.

b) Trotzdem darf man die aktuelle Strecke, die spater noch zurückgelegt werden kann, nicht vernachlässigen. Sie beträgt in diesem Beispielfall nach 1 Std. 1 mm. Das ist also noch einmal die Hälfte der Ausgangswanderung. In anderen Fällen, so z.B. im Fall 2, wandert die Nadel nach 1 Std. und nach 24 Std. jeweils noch einmal um die gleiche Entfernung, die anfänglich nach 3 min. zurückgelegt worden war. Jedoch finden wir im allgemeinen nach 24 Std. nur selten eine Bewegung.

c) In allen untersuchten Fällen zeigen sich, wie in dem Beispielfall, nach 48-stündiger konstanter Belastung die Kurven als Sättigungskurven. Es findet also regelmäßig nach längerer als 24 Std.andauernder Lordose-Haltung keine Bewegung des Gallertkerngewebes mehr statt.

Um nun eine Aussage über die durchschnittliche Wanderungsstrecke des zentralen mobilen Gewebes machen zu können, bedient man sich der Darstellung in sog. Summationskurven. Das bedeutet, die mm- bzw. prozentualen Werte der Wanderungsstrecken werden in sinnvollen Altersklassen zusammengefaßt und der für eine bestimmte Zeit geltende Durchschnittswert jeweils errechnet (s.Tabelle 3 und 4).

Tab. 3:

Belastung der hinteren Hälfte der Bandscheibe:
Wanderungsstrecke der Metallnadel in mm:
Mittelwerte der einzelnen Altersstufen:

Altersgruppe	3min	1Std.	24Std.	48Std.
A	1,0	1,62	1,75	1,75
B	2,16	2,75	2,83	2,83
C	0,75	1,25	1,25	1,25

Tab. 4:

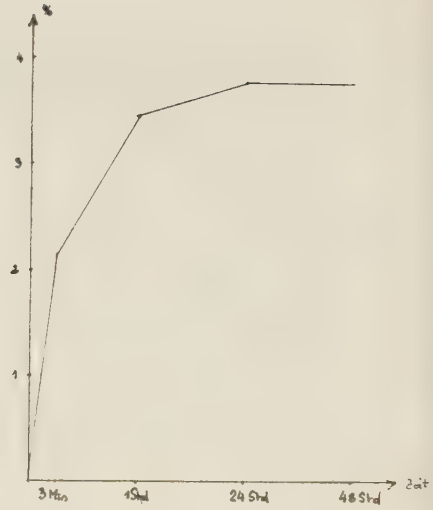
Experimentelle "Rückneigung".
Die prozentualen Werte der mittleren Wanderungsstrekken der einzelnen Altersstufen:

Altersgruppe	3min	1Std.	24Std.	48Std.
A	2,16	3,47	3,73	3,73
B	5,30	6,70	6,91	6,91
C	1,46	2,42	2,42	2,42

Die zeichnerische Darstellung zu den Werten der Tabellen 3 und 4 läßt sich aus den Kurven der Abb. 8, 9 und 10 ersehen.

Abb. 8:

Lordoseförmige Belastung: Durchschnittliche Wanderungswerte (mm-Werte in bezug auf Bandscheibentiefen) bei 18- bis 25-jährigen Versuchspersonen.



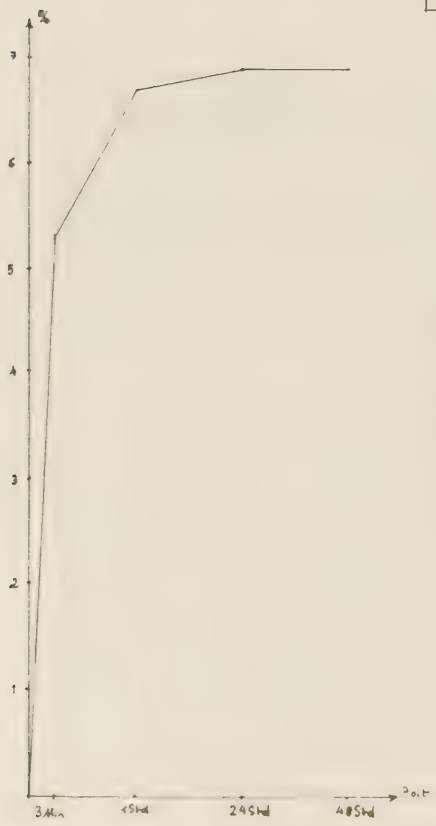
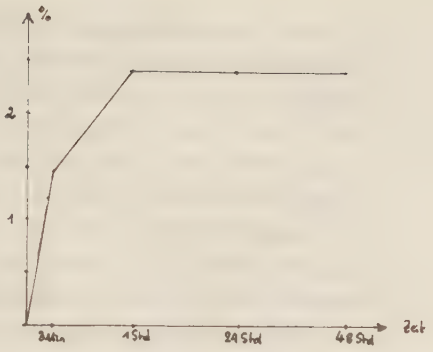


Abb. 9:

Belastung der Hinterkante der Bandscheiben: Durchschnittliche Wanderungswerte (mm-Werte in Beziehung gesetzt zu den jeweiligen Bandscheibentiefen) bei 32- bis 42-jährigen Probanden.

Abb. 10:

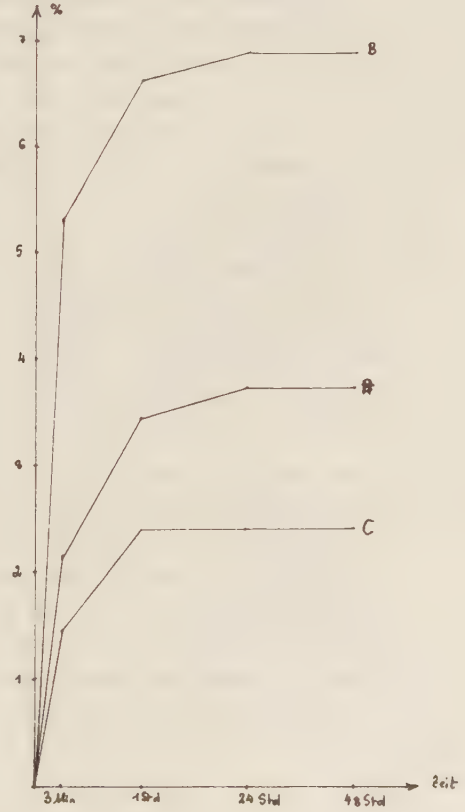
Belastung der Hinterkante der Bandscheiben: Durchschnittliche Wanderungsstrecken (die mm-Werte sind in Beziehung gesetzt zu den jeweiligen Bandscheibentiefen) bei 62- bis 77-jährigen Versuchspersonen.



Das Darzustellende läßt sich noch besser verdeutlichen, wenn man die Kurven übereinander projiziert. Die Übereinanderprojektion zeigt die Abbildung 11.

Abb. 11:

Belastung der Hinterkante der Bandscheiben: Übereinanderprojektion der durchschnittlichen Wanderungsstrecken (mm in % der Bandscheibentiefen) bei:
A: 18- bis 25-jährigen,
B: 32- bis 42-jährigen,
C: 62- bis 77-jährigen.



Aus dieser Darstellungsart läßt sich ein deutlicher Unterschied der einzelnen Altersklassen ablesen und ein guter Vergleich anstellen:

a) Nach der 3 min. anhaltenden lordoseartigen Belastung wandert die Metallnadel der 18- bis 25-jährigen Versuchspersonen um 2,16 %, das sind 57,9 % der Gesamtstrecke. Die Nadel der 32- bis 42-jährigen Patienten legt einen Weg von 5,3 % zurück, das bedeutet 76,7 % des Gesamtweges. Der Splint der 62- bis 77-jährigen Probanden bewegt sich um 1,46 %, welches eine Bewegung von 60,03 % des Gesamten ausmacht.

b) Nach der konstanten Belastung von einer Stunde ist der Splint der 18- bis 25-jährigen Patienten um 3,47 % gegenüber dem Ausgangswert verschoben, das sind 93,02 % der Gesamtwanderung. Die Nadel der 32- bis 42-jährigen ist um 6,7 % gewandert, dies sind 96,96 % der Gesamtstrecke. Der Splint der 62- bis 77-jährigen Patienten ist bereits um 2,42 % gewandert, d.h. sie hat ihren Endpunkt schon erreicht.

c) Nach 24 Std. gleichbleibender Belastung haben auch die beiden anderen Altersgruppen ihren Endwert erreicht, d.h. sie verändern ihre Lage auch nach 48 Std. dauernder konstanter Belastung nicht mehr.

d) Am weitesten gegenüber dem Ausgangswert verschoben sind zu jedem Zeitpunkt die Metallnadeln der Altersklasse B (der 32- bis 42-jährigen). Nach 3 min. dauernder Belastung erreichen die Werte der Altersgruppe A nur 40,75 % der Werte der Gruppe B, während die Altersstufe C sogar nur auf 27,54 % kommt. Nach 1 Std. erreichen die Werte der Gruppe A 51,79 % (eine Verbesserung um 11,04 %), die Gruppe C kommt bis auf 36,11 % (sie holt also um 8,57 % auf). Nach der 24-stündigen Belastung ist die Gruppe noch um 53,79 % weniger verändert als die Gruppe B. Die

Splinte der Gruppe C sind gar nicht mehr weitergewandert. Wir können also feststellen, daß das zentrale mobile Gewebe bei dem hier untersuchten Personenkreis den Belastungen im Durchschnitt am stärksten ausweicht im Alter von 32 bis 42 Jahren.

e) Die deutlichste Lageveränderung der Metallnadeln gegenüber der unbelasteten Bandscheibe zeigt sich bereits nach 3 min., und zwar, wie oben aufgezeigt, bei der Altersgruppe A um 57,9 %, der Altersgruppe B um 76,70 %, der Altersgruppe C um 60,03 % der Gesamtstrecke. Das bedeutet, daß nicht so sehr die langdauernde, als vielmehr die kurze, plötzliche Belastung für die Verschiebung des zentralen mobilen Gewebes bedeutsam ist und, übertragen auf die Verhältnisse in vivo, plötzliche, nicht durch Muskeln, Bänder usw. abgefangene Lordosierung.

2. Die "Seitneigung"

Es können zu diesem Thema wiederum 14 Versuche ausgewertet werden, bei denen eine Seiten-Belastung nach der oben beschriebenen Methode durchgeführt worden war. Wie im Abschnitt "Rückneigung" beschrieben, wurde die Bewegung der punktförmigen Metallnadel als stellvertretend für die Bewegung des ganzen mobilen Gewebes angesehen und quantitativ ermittelt:

a) nach 3-minütiger Belastung
b) nach 1-stündiger Belastung
c) nach 24-stündiger, konstanter Belastung
d) einige Male auch nach 48-stündiger Belastung.

Die gemessenen Wanderungsstrecken zeigt die Tabelle 5 an.

Tab. 5:

Seitneigung des Bewegungssegmentes: Wanderungsstrecke der Metallnadeln im zentralen mobilen Gewebe in mm.

Alter	3min.	1Std.	24Std.	48Std.	Nr.
18	5,0	7,0	8,0	8,0	1B
18	4,0	4,0	4,0	4,0	2B
25	2,0	3,0	3,0	3,0	3B
25	3,0	4,5	4,5	4,5	4B
25	1,0	1,5	1,5	1,5	5B
32	1,5	1,5	1,5	1,5	6B
32	2,0	2,5	2,5	2,5	7B
36	4,0	5,0	6,0	6,0	8B
38	2,0	3,0	4,0	4,0	9B
42	2,5	2,5	-	-	10B
62	2,5	2,5	-	2,5	11B
62	1,0	1,0	-	1,0	12B
77	2,0	2,0	2,0	-	13B
77	1,0	2,0	2,0	-	14B

Wiederum werden die Entfernungswerte (in mm) in eine Beziehung gesetzt zur jeweiligen Bandscheibenbreite, und es ergeben sich die in der Tabelle 6 aufgezeigten Werte:

Tab. 6:

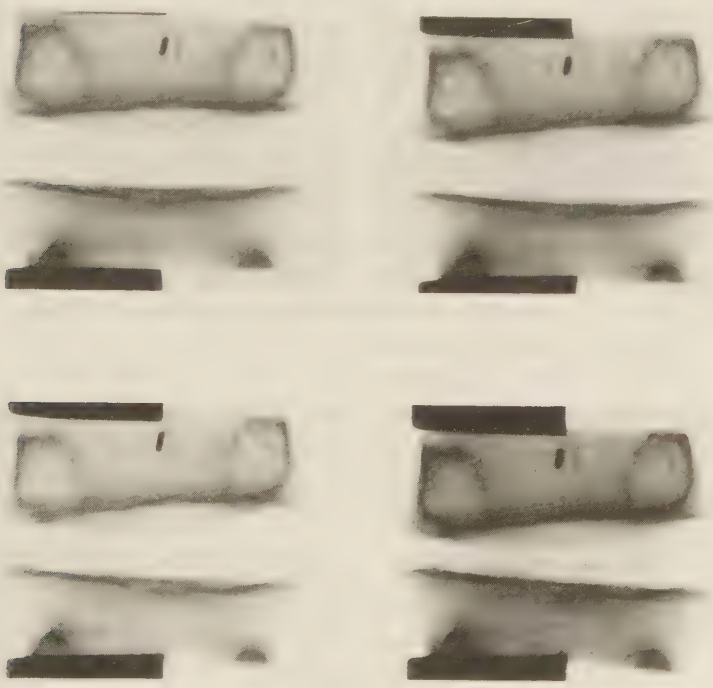
Seitneigung des Bewegungssegmentes: Die Wanderungsstrecke der Metallnadeln (in mm) wird in Beziehung gesetzt zur Bandscheibenbreite. Es ergeben sich die Wanderungsweiten als %uale Werte der Bandscheibenbreite.

Alter	3min.	1Std.	24Std.	48Std.	Nr.
18	7,57	10,6	12,12	12,12	1C
18	6,6	6,6	6,6	6,6	2C
25	3,07	4,61	4,61	4,61	3C
25	4,61	6,92	6,92	6,92	4C
25	1,51	2,27	2,27	2,27	5C
32	2,63	2,63	2,63	2,63	6C
32	3,5	4,38	4,38	4,38	7C
36	6,45	8,06	9,67	9,67	8C
38	2,94	4,41	5,88	5,88	9C
42	4,71	4,71	-	-	10C
62	3,16	3,16	-	3,16	11C
62	1,26	1,26	-	1,26	12C
77	2,81	2,81	2,81	-	13C
77	1,4	2,81	2,81	-	14C

Es soll auch für die Seitneigung eine typische Kurve herausgegriffen und näher erläutert werden: 38-jähriger Patient, Tod durch Brandunfall (dazu Abb.12 u.13).

Abb. 12:

Seitenbelastung einer Lendenbandscheibe (L4/3):
a) o h n e Belastung
b) nach 3-minütiger Belastung
c) nach 1-stündiger Belastung
d) nach 24-stündiger Belastung
(Gewicht: 200 kp.):

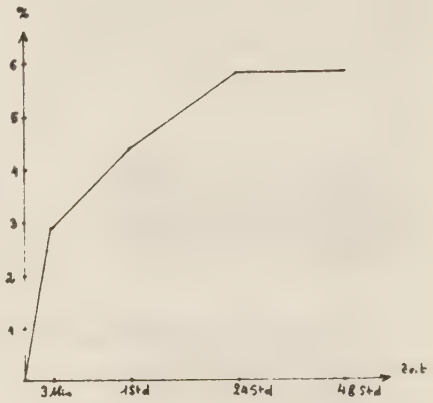


Die Wanderungsstrecke des Metallsplints beträgt nach 3 min. 2 mm, nach 1 Std. 3 mm, nach 24 Std. insgesamt 4 mm und nach 48 Std. konstant 4 mm. Die Bandscheibe ist in diesem Beispiel 68 mm breit. Aus diesen Angaben ergibt sich lt. oben Gesagtem eine prozentuale Fortbewegung der Metallnadel resp. des zentralen mobilen Gewebes um 2,94 % nach 3 min., um 4,41 % nach 1 Std., um 5,88 % nach 24 bzw. 48 Std.

Die graphische Darstellung dieser Angaben wird aus der Abbildung 13 ersichtlich.

Abb. 13:

Seitenkantenbelastung einer Lendenbandscheibe (L3/4): Wanderung der Metallnadel bei einem 38-jährigen Patienten (s.auch Abb.12). Die Wanderungsstrecke ist in Beziehung gesetzt zur Bandscheibenbreite des Segments.



Aus der Kurve der Abbildung 13 läßt sich das Nachfolgende interpretieren:

a) Der stärkste Anstieg, somit die stärkste Wanderung, erfolgt bereits nach 3 min. Die Geschwindigkeit nach der Formel: $\frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}}$ beträgt in diesem Falle:
in den ersten 3 min. 0,6 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$ bzw. 0,98 $\frac{\%}{\text{min}}$,
in der ersten Stunde: 0,0175 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$ bzw. 0,0257 $\frac{\%}{\text{min}}$,
in den übrigen 23 Stunden nur noch 0,0007 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$ bzw. 0,001 $\frac{\%}{\text{min}}$. Die Wanderung hat also nach 1 Std. nur noch um 2,6 % der ursprünglichen Geschwindigkeit stattgefunden, nach 24 Std. sogar nur noch um 0,102 %. Das bedeutet eine sehr deutliche Abnahme der Bewegungsgeschwindigkeit des Metallsplints bzw. des zentralen mobilen Gewebes.

b) Obwohl die Geschwindigkeit sehr abnimmt, darf die Lageveränderung, die sich absolut feststellen läßt, nicht vergessen werden. Sie beträgt nämlich nach 1 Std. in dem hier aufgezeigten Fall noch einmal

die Hälfte der Ausgangsbewegung. Nach 24 Std. handelt es sich wiederum um den gleichen Betrag, so daß sich insgesamt die Entfernung zum Ausgangspunkt des zentralen Gallertkerngewebes verdoppelt. Dies ist natürlich nicht generell in allen Versuchen so ausgeprägt, aber die aktuelle Wanderung ist trotzdem nicht zu übersehen.

c) Auffällig ist bei der skolioseförmigen Belastung, daß sehr häufig auch noch eine Verlagerung nach 24 Std. zu beobachten ist. Im Gegensatz dazu sind die Werte nach 48 Std. trotz konstanter Belastung mit 200 kp. nicht mehr verändert gefunden worden.

Zur Darstellung der durchschnittlichen Wanderungsstrecken werden wiederum Summationskurven benutzt, die aus den Prozentwerten der einzelnen Versuche ermittelt und nach sinnvollen Altersstufen zusammengefaßt wurden (s. dazu Tab. 7 und 8).

Tab. 7:

Belastung der Seitenkanten der Bandscheiben: Wanderungsstrecke der Metallnadeln in mm: Mittelwerte der einzelnen Altersstufen.

Altersstufe	3min.	1Std.	24Std.	48Std.
A	3,0	4,0	4,2	4,2
B	2,4	2,9	3,5	3,5
C	1,62	1,87	2,0	2,0

Tab. 8:

Belastung der Seitenkanten der Bandscheiben: Die prozentualen Werte der mittleren Wanderungsstrecken der einzelnen Altersklassen.

Altersstufe	3min.	1Std.	24Std.	48Std.
A	4,67	6,20	6,50	6,50
B	4,04	4,84	5,64	5,64
C	2,16	2,51	2,81	2,81

Die zeichnerische Darstellung zu den Werten der Tabellen 7 und 8 läßt sich aus den Kurven der Abbildungen 14, 15 und 16 ersehen.

Abb. 14:

Seitenkantenbelastung:
Durchschnittliche Wanderungsweiten (mm-Werte in Prozent der Bandscheibenbreite) bei 18- bis 25-jährigen Versuchspersonen.

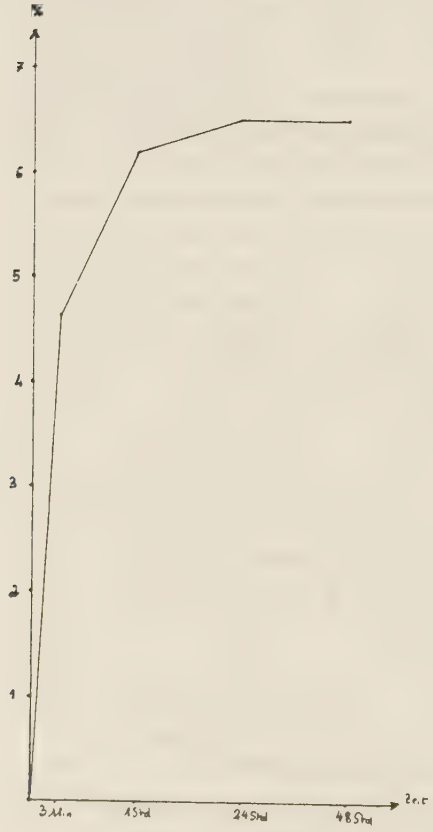


Abb. 15:

Belastung der Seitenkanten der Bandscheiben:
Durchschnittliche Wanderungswerte (mm-Werte in Beziehung gesetzt zu den jeweiligen Bandscheibenbreiten) bei 32- bis 42-jährigen Probanden.

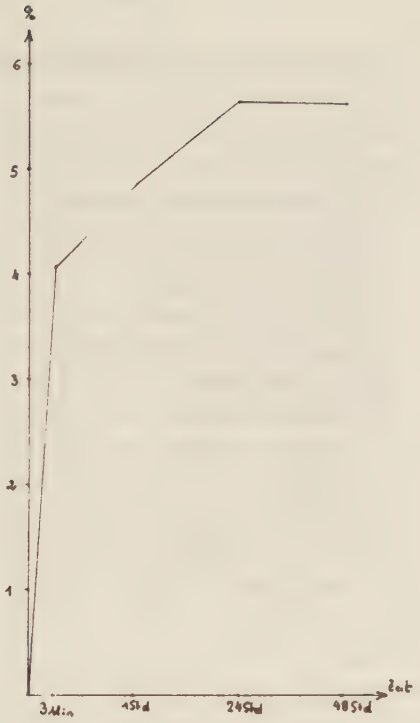
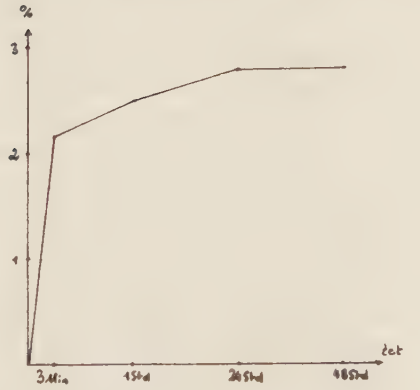


Abb. 16:

Belastung der Seitenkanten der Bandscheiben:
Durchschnittliche Wanderungsstrecken (die mm-Werte sind bezogen auf die jeweiligen Bandscheibenbreiten) bei 62- bis 77-jährigen Versuchspersonen.

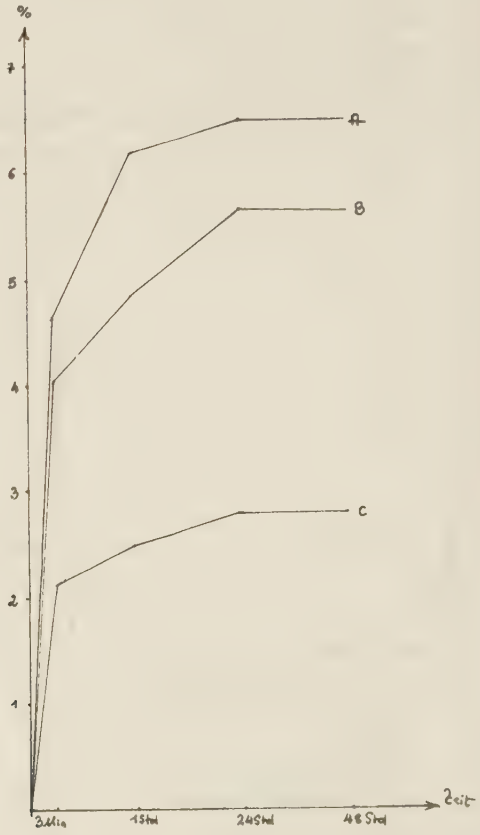


Auch in diesem Fall läßt sich das Darzustellende noch besser verdeutlichen, wenn man die Kurven übereinander projiziert.

Die Übereinanderprojektion zeigt die Abbildung 17.

Abb. 17:

Experiment: Seitenkantenbelastung der Bandscheiben: Übereinanderprojektion der durchschnittlichen Wanderungsstrecken (mm-Werte in % der jeweiligen Bandscheibenbreiten) bei:
A: 18- bis 25-jährigen,
B: 32- bis 42-jährigen,
C: 62- bis 77-jährigen Versuchspersonen.



Aus dieser Darstellungsart läßt sich ein deutlicher Unterschied der einzelnen Altersklassen ablesen und ein guter Vergleich anstellen:

a) Nach der 3 min. andauernden Seitenkantenbelastung wandert die Metallnadel der 18- bis 25-jährigen Probanden um durchschnittlich 4,67 % der Bandscheibenbreite, das sind umgerechnet auf die Gesamtwanderung 71,84 %. Das zentrale mobile Gewebe

der Gruppe der 32 bis 42 Jahre alten Patienten bewegt sich um 4,04 %, welches 71,63 % der Gesamtwanderung ausmacht, also weniger als bei der Gruppe der jüngeren Individuen. Die weiteste Strecke legt jedoch der Splint der Altersstufe der 62- bis 77-jährigen Probanden zurück, nämlich bereits 76,86 % der Gesamtstrecke (Wanderung um 2,16 %).

b) Nach der kontinuierlichen Belastung der Seitenkanten von 1 Std. Dauer haben die Metallsplinte der jüngeren Versuchspersonen um 23,54 % aufgeholt und sind somit bei 95,38 % des Gesamtweges angelangt. Die Splinte der Gruppe der 32 bis 42 Jahre alten Individuen haben sich um 14,18 % ihrem endgültigen Zielpunkt genähert, sie erreichen insgesamt 85,81 %, und diejenigen der Altersstufe C sind bei 89,32 % angelangt (also eine Verbesserung um 12,46 %).

c) Nach 24 Std. ist bei den vorliegenden Versuchen der Endpunkt erreicht, und es zeigt sich auch bei weitergeführter konstanter Belastung keine Verschiebung der Metallnadel resp. des Gallertkerngewebes mehr.

d) Man sieht an den oben (s. Tab.7 und 8) ermittelten Prozentwerten der Wanderungsstrecken, daß sowohl absolut als auch relativ der Splint im zentralen mobilen Gewebe der jüngeren Individuen (der 18- bis 25-jährigen Patienten) am weitesten gewandert ist, sogar ungefähr doppelt so weit wie die Nadel der 62 bis 77 Jahre alten Probanden. Nach 3-minütiger Seitenkantenbelastung erreichen die Metallnadeln der Gruppe B 86,5 % der Wanderung der Nadeln der Gruppe A gegenüber 46,25 % von seiten der Gruppe C. Dieses Verhältnis verschiebt sich nach der 1 Std. dauernden Belastung sogar noch mehr zu Gunsten der Gruppe A. Hiernach erreichen die Splinte der Probanden im Alter von 32 bis 42 Jahren nur 78,06 %, diejenigen der 62- bis 77-jährigen nur

40,48 % der weiteren Wanderung der Metallnadeln. Nach 24-stündiger konstanter Belastung der Seitenkanten haben die Nadeln der Altersstufe B 86,76 % der Wanderungsstrecke der Gruppe A erreicht, während die Splinte der älteren Patienten prozentual noch mehr verloren haben und nur noch 43,23 % der Entfernungsstrecke der jüngsten Probanden erreichen.

e) Genau wie bei der Versuchsreihe zur Rückneigung kann auch hier gesagt werden, daß die stärkste Veränderung sofort nach 3 min. dauernder Belastung der Seitenkante der Bandscheibe erkennbar ist, nämlich, wie oben bereits dargestellt, bei den Versuchspersonen im Alter von 18 bis 25 Jahren um 71,84 %, bei den Probanden der Altersstufe von 32 bis 42 Jahren um 71,63 % und bei den Älteren um 76,86 %. Die bedeutendste Strecke innerhalb dieser Zeit legen die Metallnadeln der älteren Individuen zurück.

3. Die "Vorneigung"

Es kommen 13 Versuche zur Auswertung in Frage, bei denen eine Belastung der Bandscheiben-Vorderkanten durchgeführt worden war, also eine Belastung, die in vivo einer Vorwärtsneigung der Wirbelsäule entsprechen würde. Die Lageveränderung des zentralen mobilen Gewebes wird erneut aus der Wanderung der im Gallertkern befindlichen, punktförmigen Metallnadel ersehen, und es ergeben sich die Wanderungsstrecken, die, wie schon in den beiden ersten Versuchsreihen, zu den vier verschiedenen Zeitpunkten abgelesen werden:

a) nach 3-minütiger Belastung mit 200 kp.,
b) nach 1-stündiger Belastung mit 200 kp.,
c) nach 24-stündiger Belastung mit 200 kp.,
d) nach 48-stündiger konstanter Belastung mit 200 kp.

Die auf diese Weise ermittelten Werte der Bewegungen zeigt die Tabelle 9.

Tab. 9:

Experimentelle Vorneigung des Bewegungssegments: Wanderungsstrecke der Metallnadeln im zentralen mobilen Gewebe in mm (Segment L3/2)

Alter	3min.	1Std.	24Std.	48Std.	Nr.
18	-1,0	0	3,0	3,0	1C
25	1,0	2,0	2,0	2,0	2C
25	1,0	2,0	2,0	2,0	3C
25	0,5	0,5	0,5	0,5	4C
25	1,0	1,5	1,5	1,5	5C
25	0,5	0,5	1,0	1,0	6C
32	1,0	2,0	2,0	2,0	7C
32	-1,0	0	1,0	1,0	8C
36	1,0	1,5	1,5	1,5	9C
62	1,0	4,0	4,0	4,0	10C
77	0,5	1,0	1,0	1,0	11C
77	0	1,0	1,0	1,0	12C
77	1,5	2,0	2,0	2,0	13C

Um eine Vergleichsmöglichkeit mit den beiden vorangegangenen Versuchsserien und außerdem innerhalb der Altersstufen zu erhalten, wird analog dazu wiederum die Entfernung des Splints vom Ausgangspunkt (in mm) in Beziehung gesetzt zu der zu jedem Segment gehörenden Bandscheibentiefe (in mm). Man erhält dann die Prozentzahl, die einen Vergleich der Verschiebeversuche zuläßt (s. dazu Tab. 10).

Tab. 10:

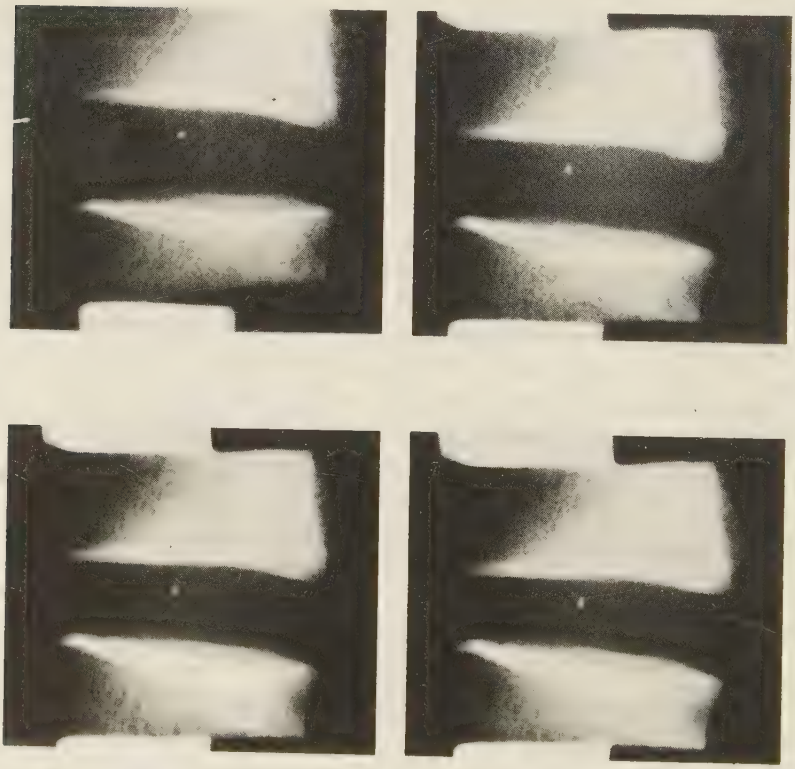
Belastung der vorderen Kante des Bewegungssegmentes: Wanderungsstrecke der Metallnadeln (in mm) in Beziehung zur Bandscheibentiefe. Die Wanderungsweiten stellen sich dar als %-Werte der Bandscheibentiefen.

Alter	3min.	1Std.	24Std.	48Std.	Nr.
18	-1,92	0	5,76	5,76	1C
25	2,04	4,08	4,08	4,08	2C
25	2,04	4,08	4,08	4,08	3C
25	1,02	1,02	1,02	1,02	4C
25	2,08	3,12	3,12	3,12	5C
25	1,06	1,06	2,12	2,12	6C
32	2,5	5,0	5,0	5,0	7C
32	-2,5	0	2,5	2,5	8C
36	2,5	3,75	3,75	3,75	9C
62	1,88	7,54	7,54	7,54	10C
77	1,0	2,0	2,0	2,0	11C
77	0	2,0	2,0	2,0	12C
77	3,0	4,0	4,0	4,0	13C

Wir betrachten als typischen Vertreter einen Versuch mit einem Präparat von einem 25-jährigen Patienten (Tod durch Alkoholabusus), s. dazu Abbildung 18.

Abb. 18:

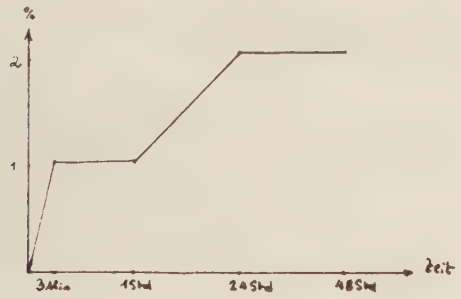
Experimentelle Vorneigung eines Bewegungssegmentes (25-jähriger Patient, Segment L2/L3):
a) ohne Belastung,
b) nach 3-minütiger Belastung,
c) nach 1-stündiger Belastung,
d) nach 24-stündiger Belastung.
(Gewicht: 200 kp.)



Der Splint hat sich nach 3 min. 0,5 mm vom Ausgangspunkt entfernt, nach 1 Std. nicht weiter, jedoch nach 24 Std. erneut um 0,5 mm. Danach bleibt seine Lage trotz weiterer konstanter Belastung gleich. Die Bandscheibentiefe beträgt 47 mm, das bedeutet, es wurde nach 3 min. 1,06 % dieses Durchmessers durchwandert, nach 24 Std. insgesamt 2,12 %. Die zeichnerische Darstellung können wir aus der Abbildung 19 entnehmen.

Abb. 19:

Kyphoseartige Belastung einer Lendenbandscheibe (L2/L3). Wanderung der Metallnadel bei einem 25-jährigen Patienten (zu Abb. 18). Die Wanderungsentfernung ist bezogen auf die Bandscheibentiefe des Segmentes.



Aus der Abbildung 19 läßt sich folgendes ersehen:

a) In den ersten 3 min. steigt die Kurve um 1,06 % an, das bedeutet eine Wanderungsgeschwindigkeit von 0,16 $\frac{mm}{min.}$, entsprechend 0,35 $\frac{\%}{min.}$. Nach 1-stündiger Belastung ist der Metallsplint im zentralen mobilen Gewebe offensichtlich nicht weitergewandert, jedoch nach 24 Std. noch einmal um den gleichen Betrag wie zu Anfang, nämlich 0,5 mm. Dies entspricht einer Geschwindigkeit von 0,00036 $\frac{mm}{min.}$ bzw. 0,00076 $\frac{\%}{min.}$. Man sieht deutlich, daß die Wanderungsgeschwindigkeit entscheidend nachgelassen hat; die Belastung hat sich allerdings absolut noch ausgewirkt.

b) Wir können die Strecke, die nach 24 Std. noch zurückgelegt wurde, nicht vernachlässigen, da sie immerhin in dem vorliegenden Fall noch einmal die gleiche Entfernung ausmacht wie die anfängliche Verlagerung. In anderen Fällen ist es auch möglich, daß schon nach 1-stündiger Belastung eine weitere Wanderung stattgefunden hat, z.T. sogar sehr bedeutend, wie das Beispiel des Versuchs 10 zeigt, bei dem der Splint nach 1 Std. um 3 mm weitergewandert ist.

c) Keine Veränderungen mehr werden nach 48 Std. dauernder Belastung im Sinne einer Vorwärtsneigung gefunden. Wir sehen das auch an der graphischen Darstellung, bei der sich die Wanderungskurve als Sättigungskurve darstellt.

Betrachtet man nun die ganze Versuchsreihe, so kann man zunächst wieder eine Einteilung in Altersstufen vornehmen und innerhalb dieser Gruppen dann unterschiedliche Ergebnisse vergleichen. Wir bedienen uns in Tabelle 11 und 12 erneut der Summationswerte.

Tab. 11:

Belastung der Vorderkante der Bandscheibe:
Wanderungsstrecken der Metallnadeln in mm:
Mittelwerte der einzelnen Altersstufen.

Altersstufe	3min.	1Std.	24Std.	48Std.
A	0,5	1,08	1,6	1,6
B	0,25	1,16	1,5	1,5
C	0,75	2,0	2,0	2,0

Tab. 12:

(s.nächste Seite)

Tab. 12:

Belastung der Vorderkanten der Bandscheiben:
Die prozentualen Werte der mittleren Wanderungsstrecken der einzelnen Altersstufen.

Altersstufe	3min.	1Std.	24Std.	48Std.
A	1,05	2,22	3,36	3,36
B	0,83	2,91	3,75	3,75
C	1,47	3,88	3,88	3,88

Die zeichnerische Darstellung zu den Werten der Tabellen 11 und 12 läßt sich aus den Kurven der Abbildungen 20, 21 und 22 ersehen.

Abb. 20:

"Vorneigung" der Bewegungselemente: Durchschnittliche Wanderungswerte (mm in Prozent der Bandscheibentiefe) bei 18- bis 25-jährigen Versuchspersonen.

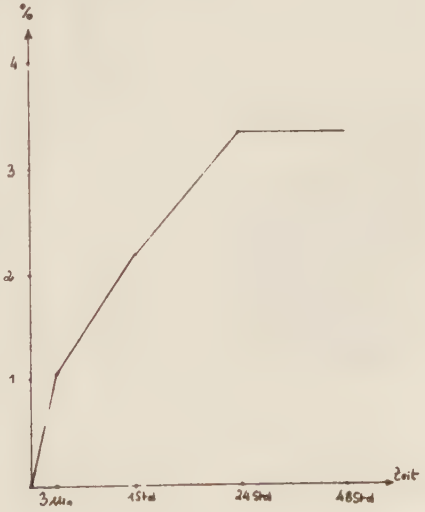


Abb. 21:

"Vorneigung" der Bewegungssegmente: Durchschnittliche Wanderungswerte (mm in Prozent der Bandscheibentiefe) bei 32 bis 36 Jahre alten Versuchspersonen.

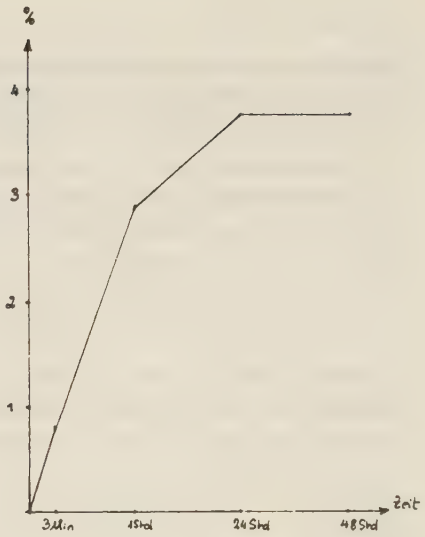
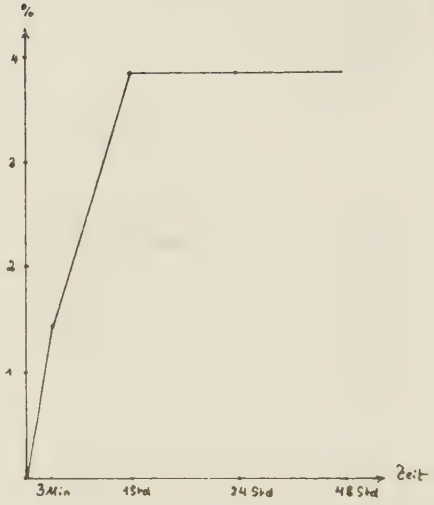


Abb. 22:

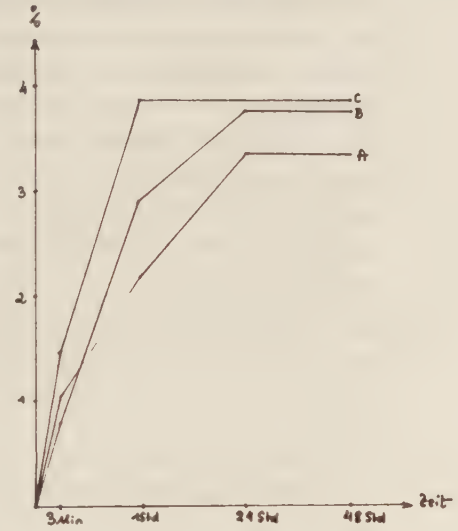
"Vorneigung" der Bewegungssegmente: Durchschnittliche Wanderungswerte (mm in Prozent) der Bandscheibentiefe) bei 62 bis 77 Jahre alten Probanden.



Das Darzustellende läßt sich noch besser verdeutlichen, wenn man die Kurven übereinander projiziert. Die Übereinanderprojektion zeigt die Abbildung 23.

Abb. 23:

Kyphoseartige Belastung der Bandscheiben:
Übereinanderprojektion der durchschnittlichen Wanderungsstrecken (mm-Werte in % der jeweiligen Bandscheibentiefen) bei
A: 18- bis 25-jährigen,
B: 32- bis 36-jährigen,
C: 62- bis 77-jährigen.



Dabei zeigt sich ein gewisser Unterschied der einzelnen Altersgruppen, der zu erläutern ist:

a) Nach der 3-minütigen Belastung der Vorderkante der Bandscheiben ist der Metallsplint der Gruppe A im Durchschnitt um 1,05 % gewandert, dies entspricht 31,25 % der Gesamtstrecke. Die Nadel der Gruppe B ist durchschnittlich um 0,83 % gewandert, also nur 22,13 % der Gesamtstrecke. Der Splint der Gruppe C hat sich um 1,47 % verlagert, das sind 37,88 % der endgültigen Wanderung.

b) Nach der über eine Stunde konstant gehaltenen Belastung mit 200 kp. hat sich die Metallnadel der 18 bis 25 Jahre alten Versuchspersonen um 2,22 % verschoben, ist also insgesamt 66,07 % gewandert.

Das bedeutet, sie hat in dieser Zeit 34,82 % mehr erreicht. Die mittlere Altersstufe zeigt bedeutend größere Veränderungen, nämlich um 55,47 % mehr. Der Splint erreicht somit 77,6 % der Gesamtstrecke, wohingegen der Splint der Gruppe C, der 62 bis 77 Jahre alten Probanden, bereits mit 3,88 % durchschnittlich den Endpunkt der Wanderung erreicht hat.

c) Nach der Belastung von 24 Std. Dauer mit konstant gehaltenem Gewicht haben auch die Metallnadeln der beiden anderen Versuchsgruppen (A und B) ihren Endpunkt erreicht.

d) Am weitesten gegenüber dem Ausgangspunkt verschoben sind bei dieser Belastungsart zu allen Zeiten die Metallsplinte des zentralen mobilen Gewebes der Altersstufe der 62 bis 77 Jahre alten Individuen. Nach der Belastung von 3 min. Dauer wird von der Gruppe A ein Wert von 71,42 % (gegenüber der Gruppe C) erreicht, von der Gruppe B hingegen nur 56,46 %. Nach der Belastung von der Dauer einer Stunde zeigt sich, daß die Nadeln der 62- bis 77-jährigen sehr viel weitergewandert sind als die der Gruppe A. Diese haben der Gruppe C gegenüber lediglich eine Entfernung von durchschnittlich 57,21 % erreicht, also ein Minus von 14,21 %, während der Ausgleich der Gruppe B ein Plus von 18,55 % zeigt, so daß diese Altersklasse 75,0 % der Wegstrecke der Gruppe C erreicht hat. Nach 24 Std. dauernder konstanter Belastung kann man jedoch bemerken, daß die Splinte der Altersgruppe A wieder beträchtlich aufgeholt haben, nämlich um 29,38 %. Diese Metallnadeln sind durchschnittlich bei 86,59 % der Verschiebung der Gruppe C angelangt, diejenigen der Gruppe der 32 bis 36 Jahre alten Individuen kommen sogar auf 96,64 % und verbessern sich damit um 21,64 %.

V) DISKUSSION

Die Untersuchungen über die Mobilität des Nucleus pulposus zeigen, daß bei einer experimentell durchgeführten asymmetrischen Belastung der Gallertkern stets in die Richtung der weniger belasteten Seite verschoben wird. Diese Ergebnisse bestätigen somit die von KRÄMER schon 1973 aufgestellte Vermutung, daß das zentrale mobile Gewebe der Bandscheibe einem einwirkenden Druck zur entlasteten Seite hin ausweicht und dort bei intakter Struktur und Funktion des Anulus fibrosus abgefangen wird. Gleichzeitig wird damit die 1964 von SCHENK getroffene Behauptung widerlegt, welche besagt, daß der Gallertkern bei asymmetrischer Belastung zur jeweils konkaven, d.h. belasteten Seite wandere.

Die Entfernungen, die bei den Versuchen durch die Metallnadel im zentralen mobilen Gewebe zurückgelegt werden, sind beträchtlich. Es erscheint uns angebracht, hierzu noch einiges zu sagen.

Die durchschnittliche Länge der Wanderungsstrecken ist bei den einzelnen Altersklassen und Belastungsarten unterschiedlich. Bei den jüngeren (18- bis 25-jährigen) Individuen wandert der Metallsplint am weitesten bei der experimentellen Seitenkantenbelastung, am wenigsten bei der kyphoseartigen Belastung. Einen Mittelwert nimmt die Belastungsart ein, die der Lordose entspricht. Die mittlere Altersgruppe (32 bis 42 Jahre) zeigt die größte Splintwanderung bei der lordoseförmigen Belastungsart und weniger Wanderung bei der Belastung der Seitenkanten der Bewegungssegmente. Die geringste Lageveränderung der Metallnadel ist bei der kyphoseartigen Belastung zu erkennen. Und bei der Gruppe der älteren Patienten (62 bis 77 Jahre) beobachten wir die stärkste Wanderung der Metallnadel bei der Vorderkantenbelastung, bedeutend weniger bei

der Seitenkantenbelastung, am wenigsten jedoch bei der Belastung der Hinterkanten der Zwischenwirbelscheiben. Wir können demnach sagen, daß es sehr vom Alter abhängt, bei welcher Art von Bandscheibenneigung die größten Werte der Gallertkernverschieblichkeit erreicht werden.

Betrachtet man diese Resultate von den einzelnen Belastungsarten aus, so muß festgehalten werden, daß bei der Belastung im Sinne einer Rückneigung am weitesten die Splinte der Gruppe B wandern, nämlich um durchschnittlich 6,91 %, am wenigsten die Nadeln der Gruppe C (der 62- bis 77-jährigen) = 2,42 %. Eine Mittelstellung nimmt die Gruppe A ein: 3,73 %. Bei der Belastung im Sinne einer Seitneigung wandern am weitesten die Splinte der Gruppe A = 6,5 %, weniger weit die der Gruppe B = 5,64 %, am wenigsten die der Gruppe C = 2,81 %. Bei der kyphoseartigen Belastung ist die größte Strecke bei der Gruppe C zu verzeichnen = 3,88 %, bei der Gruppe B nur 3,75 % und bei der Gruppe A sogar nur 3,36 %.

Ein bedeutender Punkt, auch für die klinischen Folgen, ist weiterhin die Geschwindigkeit der Gallertkernverschieblichkeit. Wir beobachten, daß die Nadeln der Gruppe B bei der Belastung im Sinne von Rückneigung nach 3 min. die weitesten Strecken zurückgelegt haben (5,36 %), eine weniger weite Strecke diejenigen der Gruppe A (2,16 %), die am wenigsten weite Entfernung die der Gruppe C (1,46 %). Bei der experimentellen Seitneigung wurde in der gleichen Zeit die größte Strecke zurückgelegt von der Gruppe A = 4,67 %, eine weniger große von der Gruppe B = 4,04 % und die geringste Strecke von der Gruppe C = 2,81 %.

Die entsprechenden Angaben zu der experimentell durchgeführten Vorneigung lauten:
Gruppe C: 1,47 % Gruppe A: 1,05 % Gruppe B: 0,83 %.

Die Prozentangaben bedeuten jeweils: Aktuelle Wanderung (in mm), bezogen auf die Breite bzw. Teife der Bandscheiben (ebenfalls in mm).

Alle diese Zahlen sind kleine Werte. Dennoch darf man sich nicht über die klinische Bedeutung hinwegtäuschen, denn immerhin muß man bedenken, daß hier lediglich die Kraft von 200 kp. aufgewendet wurde, die Werte innerhalb der Bandscheibe in vivo dagegen wesentlich höher ansteigen, nämlich auf bis zu 1000 kp. (NACHEMSON 1969). So läßt sich auch erklären, daß wir trotz zum Teil über 48 Std. andauernder Belastung in keinem Falle einen Bandscheiben-Prolaps provoziert haben. Es müssen also in vivo doch ganz erheblich höhere Druckwerte erreicht werden, sofern die Bandscheibe nicht vorgeschädigt ist. In dieser Versuchsreihe konnten für jede Belastungsart nur etwa 14 Versuche ausgewertet werden. Diese relativ geringe Anzahl garantiert nur beschränkt eine statistische Auswertbarkeit der Ergebnisse. Es muß hier ausdrücklich vermerkt werden, daß durch die oben gewonnenen Resultate lediglich eine Tendenz, jedoch keine Aussage im Sinne einer Gesetzmäßigkeit getroffen werden kann, da der Bereich der großen Zahlen, der dafür unbedingte Voraussetzung ist, nicht gegeben war.

a) Es stand nur eine gewisse Anzahl von Präparaten zur Verfügung, da, wie oben (Abschnitt III)1.c)bb) dargelegt, diese bestimmte Voraussetzungen erfüllen mußten (keine Wirbelsäulenbrüche, also z.B. keine Todesfälle durch Selbstmord etc.).

b) Die Versuchsmethode ist sehr aufwendig, sowohl was die Zeit für den einzelnen Versuch (mehrere Tage, s. Dauerbelastung über 48 Stunden), aber auch was das zu verwendende Material anbetraf.

c) Ferner ist zu erwähnen, daß die Versuche an Präparaten

durchgeführt wurden, die von der natürlichen Umgebung völlig isoliert worden waren. Es wurden zwar die Ernährungsbedingungen der Bandscheiben weitgehend erhalten, die möglichen mechanischen Einflüsse des Umgebungsgewebes und besonders der anliegenden Knochenstrukturen jedoch vollkommen vernachlässigt. Denkbar ist, daß ähnliche Versuche an Präparaten, die noch umgeben sind von Wirbelbogen, Wirbelbogengelenken, Bändern, Muskeln etc. weitere Aufschlüsse bringen. Unter den angegebenen Voraussetzungen können die Werte, die ermittelt wurden, als volle statistische Aussagen verwendet werden. Auf jeden Fall läßt sich auf Grund unserer Versuchsserien eine eindeutige Tendenz erkennen.

Betrachten wir die Tabelle der Seite 57, so fällt auf, daß zweimal bei der Belastung im Sinne einer Vorneigung der Bewegungssegmente ein negativer Wert auftaucht (Versuch 1 C und 8C). Das bedeutet, daß der Metallsplint in diesen beiden Fällen nicht zur entlasteten, sondern zur belasteten Seite gewandert war. Dies trat jedoch nur in zwei Fällen und außerdem lediglich bei der Vorderkantenbelastung der Bewegungssegmente auf. Mit den uns vorliegenden Mitteln konnte aber dieser Umstand nicht hinreichend erklärt werden. Eine falsche Belastung und Projektion ebenso wie eine falsche Lagerung im zentralen mobilen Gewebe lag mit Sicherheit nicht vor, da die Metallnadel nach 1 Std., nach 24 Std. und nach 48 Std. ganz normal (d.h. also zur unbelasteten Seite hin) gewandert war (in beiden Fällen). Einen Zusammenhang mit der Behauptung von SCHENK, daß bei Belastung der Nucleus pulposus zur belasteten Bandscheibenseite wandere, müssen wir ebenfalls aus dem gleichen Grunde und wegen der übrigen Versuchsergebnisse (Rückneigung und Seitneigung waren in keinem Fall betroffen) ablehnen.

Aus den Resultaten unserer Versuchsserien ergeben sich die Folgen für die Verhältnisse in vivo. Das zentrale mobile Gewebe bewegt sich bei einer asymmetrischen Belastung zur unbelasteten Seite und wird dort bei intaktem Anulus fibrosus von diesem abgefangen. Befindet sich an dieser Stelle jedoch eine Widerstandsminderung, z.B. in Form einer Erschlaffung des Faserrings durch präformierte Faserrupturen, so ist leicht eine Protrusion bzw. ein Prolaps möglich. Dabei müssen wir auch noch die anatomische Lage und Funktion der Bänder berücksichtigen, die außerhalb des Anulus fibrosus ebenfalls noch ein großes Hindernis für einen eventuellen Vorfall darstellen können. Relevant sind diese Vorgänge insbesondere bei Patienten, deren Gallertkern einen hohen Innendruck aufweist, wohingegen der Faserring bereits im Rahmen der allgemeinen Verschleißerscheinungen und Alterungsvorgänge deutlich an Widerstandsfähigkeit eingebüßt hat. Wenn in dieser Situation der Verschiebedruck auf das Gallertkerngewebe groß genug und die Rißfestigkeit des Faserrings bereits gemindert ist, so werden die im allgemeinen recht widerstandsfähigen Verstärkungsbänder entweder vor dem Verfallgewebe hergeschoben (Protrusion) oder sogar überwunden und durchbrochen (Prolaps). Die klinischen Manifestationen können in beiden Fällen gleich oder ähnlich sein.

Eine besonders schnelle Wanderung tritt in unseren Versuchen stets nach 3-minütiger Belastung mit einem Gewicht von 200 kp. auf. Die Belastung von 3 min. Dauer wurde von uns aus technischen Gründen einer momentanen, ruckartigen Bewegung gleichgesetzt, und es zeigte sich, daß hierbei insgesamt die größten Veränderungen der Gallertkernlage zu beobachten waren. Man kann jedoch Wanderungen der Metallnadel im zentralen mobilen Gewebe noch bis zu 24 Std. nach Beginn der Dauerbelastung mit 200 kp. erkennen. Das bedeutet, bezogen auf das Verhalten der Bandscheiben in vivo, daß

bei langdauernder, gleichmäßiger Belastung der Zwischenwirbelscheibe, z.B. längerer Sitzhaltung der Wirbelsäule oder häufiger Stoßbelastung der Bandscheiben beim Autofahren, die Lage des Gallertkerns sich noch nach Stunden (bei gleichbleibendem Druck) verändern kann. Diese Umstände werden natürlich noch verschlimmert, wenn es dann auch noch zusätzlich zu einer ruckartigen Bewegung, z.B. einer plötzlichen Vorbeugung beim Aufstehen nach langem Sitzen, kommt. Die sich daraus für die Prophylaxe ergebenden Konsequenzen sind offensichtlich:

a) Es sollte darauf geachtet werden, daß es stets zu einer gleichmäßigen Belastung der ganzen Bandscheibe kommt. So kann eine Druckverteilung stattfinden. Der Gallertkern wird zwar als Ganzes komprimiert, seine Oberfläche verbreitert und vergrößert sich. Er stellt sich in dieser Situation im Röntgenbild flacher und ovaler dar, aber er weicht nicht zu einer Seite aus und trifft infolgedessen auch nicht auf eine eventuell weniger resistente Stelle des Anulus fibrosus. Ein Beispiel dafür stellt die von KRÄMER entworfene Sitzhaltung beim Autofahren dar.

b) Wir können beobachten, daß bei einer länger anhaltenden Vorderlastigkeit des Rumpfes, z.B. bei sog. "schlechter Haltung", bei Schwangerschaften oder Fettleibigkeit eine reflektorische Beckenkippung eintritt, die mit verstärkter Hohlkreuzbildung einhergeht und so, wenn dieser Zustand über eine längere Zeitspanne anhält, zur ständigen Überlastung und Mangelernährung der hinteren Bandscheibenabschnitte führt. Die gleichen Folgeerscheinungen entstehen bei seitlicher Wirbelsäulenverbiegung. Diese kommen besonders oft durch Veränderungen am Bewegungsapparat zustande, so z.B. durch den bei einer Beinverkürzung bestehenden Becken-

schiefstand. Eine auf die Dauer ebenfalls sehr schädliche Wirbelsäulenbelastung entsteht durch häufiges langandauerndes Sitzen mit gekrümmter Wirbelsäule in der sog. "vorderen Sitzhaltung". Hierbei sind besonders Schreibtischtätigkeit, aber auch lange, häufige Autofahrten zu nennen. Zweckmäßig zur Vermeidung einer zu starken Verschiebung des Gallertkerns in eine Richtung, gleichzeitig zur Vermeidung von Zermürbungen bestimmter Faserringanteile ist in allen Fällen eine häufige Stellungsänderung mit dem Effekt, daß der Gallertkern stets zu unterschiedlichen Seiten gedrängt wird und es so nicht zu einer fortlaufenden Dauerbelastung und Dauerschädigung einer Faserringpartie kommt. Der Möglichkeit einer Zerreißung oder Vorwölbung des Anulus fibrosus durch einen Vorfall von lumbalem Bandscheibengewebe wird dabei vorgebeugt.

VI) ZUSAMMENFASSUNG

Zum Thema "Experimentelle Untersuchungen zur Mobilität des Nucleus pulposus in lumbalen Bandscheiben" wurden drei Versuchsreihen durchgeführt, in denen jeweils mittels einer im zentralen mobilen Gewebe befindlichen Metallnadel die Verschieblichkeit des Gallertkerngewebes an lumbalen Bewegungssegmenten untersucht wurde. Es konnten für die Belastung der Hinter- und Seitenkanten der Zwischenwirbelscheiben jeweils 14, für die Belastung der Vorderkanten der Bandscheiben 13 Präparate untersucht und ausgewertet werden. Im Vorversuch wurde gezeigt, daß die Verschiebung der Nadel identisch ist mit einer Gewebeverschiebung.
Das Resultat zeigt sich wie folgt:

a) Bei einer experimentell durchgeführten asymmetrischen Belastung wird der Gallertkern stets in die Richtung der weniger belasteten Seite verschoben.

b) Die Wanderung der Metallnadel bzw. des zentralen mobilen Gewebes ist bei den 18 bis 25 Jahre alten Individuen am größten bei der Seitenkantenbelastung, weniger groß bei der Hinterkantenbelastung und am geringsten bei der Vorderkantenbelastung der Bandscheiben. Bei der mittleren Altersgruppe (32 bis 42 Jahre) beobachten wir die größten Werte bei der Hinterkantenbelastung, die kleinsten Werte bei der Vorderkantenbelastung. Die Belastung der Seitenkanten ergibt einen mittleren Wanderungswert. Die Gruppe der 62 bis 77 Jahre alten Individuen zeigt die stärkste Lageveränderung der Metallnadel bei der Vorderkantenbelastung, eine weniger große Verlagerungstendenz bei der Seitenkantenbelastung und die geringste Wanderung bei der Hinterkantenbelastung der Zwischenwirbelscheiben. Daraus ergibt sich, daß die Verschiebbarkeit des Gallertkerngewebes vom Alter abhängig ist.

c) Bei der Belastung im Sinne einer experimentellen Rückneigung wandert das zentrale mobile Gewebe

der mittleren Altersgruppe am weitesten, weniger weit wandert dasjenige der 18- bis 25-jährigen und am wenigsten das der Gruppe der 62 bis 77 Jahre alten Individuen. Bei der Seitenkantenbelastung werden die größten Entfernungen bei der Altersgruppe der 18- bis 25-jährigen beobachtet und die geringsten Strecken bei der Gruppe der 62- bis 77-jährigen. Die Entfernungswerte der mittleren Altersgruppe liegen dazwischen. Die Vorderkantenbelastung der Zwischenwirbelscheiben zeigt die größten Werte bei der Gruppe der älteren Patienten und weniger große Werte bei der mittleren Altersklasse. Die bei den jüngsten Individuen applizierten Splinte sind am wenigsten weit verlagert.

d) Die Geschwindigkeit der Metallsplintwanderung, d. h. die Entfernung der Metallnadel vom Ausgangspunkt nach 3 min., ist bei der Hinterkantenbelastung am größten bei der mittleren Altersgruppe, weniger groß bei der Gruppe der 18 bis 25 Jahre alten Probanden. Die geringste Geschwindigkeit zeigen die Metallnadeln der höchten Altersstufe. Bei der experimentellen Seitneigung der Zwischenwirbelscheiben wurden in der gleichen Zeit die größten Strecken zurückgelegt von den Metallsplinten der Gruppe der 18- bis 25-jährigen, eine weniger große durchschnittliche Strecke von der mittleren Altersstufe und die kleinste Strecke von der Gruppe der 62- bis 77-jährigen. Die entsprechenden Ergebnisse aus der Versuchsreihe der "Vorneigung" sind: Größte Wanderungsstrecke bei der Gruppe der 62- bis 77-jährigen, kleinste Entfernung bei der mittleren Altersstufe. Ein im Durchschnitt zwischen diesen beiden liegender Wert ergab sich bei den Versuchen an Präparaten der jüngsten Individuen.

Die klinischen Folgen der Verlagerungen wurden diskutiert.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr. Jürgen Krämer für die Überlassung des Themas und für seine Betreuung, seine Hilfe und seine Anregungen bei der Erstellung dieser Arbeit danken.

Ebenfalls möchte ich Herrn Prof. Dr. K.P. Schulitz, Direktor des Orthopädischen Instituts der Universität Düsseldorf, dafür danken, daß ich an seinem Institut diese Untersuchungen durchführen durfte.

Mein Dank gilt auch den Angestellten der Röntgen-Abteilung des Orthopädischen Instituts, die mir bei der Erstellung der Röntgenaufnahmen geholfen haben.

Ganz besonders möchte ich auch Herrn Prof. Dr. Schweitzer vom Gerichtsmedizinischen Institut der Universität Düsseldorf hervorheben, der so freundlich war, mir die Präparate für die Versuche zur Verfügung zu stellen.

LITERATURVERZEICHNIS

ALTENSTEIN, G.: Diskographie an Hals- und Lendenwirbelsäule. Z. Orthop. 102, 357-366 (1967)

ANDRAE, W.A.: Über Knorpelknötchen am hinteren Bandscheibenumfang. Beitr. Path. Anat. 82, 464 (1929)

ARCT, W.A.: Die degenerativen Veränderungen der Lenden-Kreuzbeinregion als Ursache intensiver Schmerzen. Beitr. Orthop. 17, H.11, 700 (1970)

ARMSTRONG, J.: Lumbar Disc Lesions., London (1965)

ASSHOFF, H.: Zur konservativen Behandlung des lumbalen Bandscheibenvorfalls. Z. Orthop. 101, 448 - 455 (1966)

BAUMANN, J.: Überlastungsschäden der Wirbelsäule unter besonderer Berücksichtigung der Diskushernie. Zbl.Chir. 74, 1265 (1949)

BENNINGHOFF, A. und GOERTTLER, K.: Lehrbuch der Anatomie des Menschen. Band 1, Urban- und Schwarzenberg-Verlag (1968)

BÖHMIG, R.: Die Blutgefäßversorgung der Wirbelscheiben, das Verhalten des intervertebralen Chordasegmentes und die Bedeutung beider für die Bandscheibendegeneration. Arch. Klin. Chir. 158, 347 (1930)

BOEMKE, F.: Feingewebliche Befunde beim Bandscheibenvorfall. Chirurg. 267, 484 (1951)

BRADFORD, F.R.: und SPURLING, R.GLEN: Die Bandscheibe. Discus intervertebralis. Enke-Verlag (1950)

BRAUN, W.: Ursachen des lumbalen Bandscheibenvorfalls. Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis. Band 43, Hippokrates-Verlag, Stgt.(1969)

BUDDECKE, E.: und SZIEGOLEIT, M.: Isolierung, chemische Zusammensetzung und altersabhängige Verteilung von Mucopolysacchariden menschlicher Zwischenwirbelscheiben. Ztschr. Physiol. Chem. 337, 66-78 (1964)

BÜRGER, zitiert nach ZUKSCHWERDT: Wirbelgelenk und Bandscheibe. Hippokrates-Verlag, Stuttgart (1960)

BÜRKLE DE LA CAMP, H.V.: und BETZEL, F.: Bandscheibenleiden, Ursachen, Vorbeugung, Heilung. Umschau-Verlag, Frankfurt (1960)

BUFFARD, E.: Die Diskographie in der Diagnostik der Bandscheibenhernie. J. Radiol. Electrol. 32, 756 (1951)

CAILLIET, R.: Lumbar discogenic disease: only the elderly are more vulnerable. Geriatrics 30, 73-76 (1975)

CLEMENS, H.J.: Die Vaskularisation der Wirbelsäule und des Rückenmarks. In: Wirbelsäule und Nervensystem. Thieme-Verlag, Stuttgart (1970)

COTTA, H.: und HINZ, P.: Bandscheibenschäden. Ursachen, Häufigkeit, Therapie. Hippokrates-Verlag, Bd.44, 402-407 (1973)

COVENTRY, M.: Anatomy of the Intervertebral Disc. Chir. Orthop. 67, 9-15 (1969)

COVENTRY, M.B.: CHORMLY, R.K.: KERNOHAN, J.W.: Intervertebral Disc: its anatomy and pathology. J.Bone Jt. Surg. 27, 195, 233 (1945)

DAHMEN, G.: Submikroskopische Untersuchungen an Wirbelbandscheiben. Z. Rheumaforsch. 22, 322 (1963)

DAVIDSON, E.A.B.: SMALL, W.: PERCHEMLIDES, P.: BAXLEY, W.: Age-dependent metabolism disc. J. Biol. Chem. 2951 (1959)

DREXLER, L.: Röntgenanatomische Untersuchungen über Form und Krümmung der Halswirbelsäule in den verschiedenen Lebensaltern. Hippokrates-Verlag, Band 23

EMMINGER, E.: Anatomie und Pathologie des Bewegungssegmentes der Wirbelsäule. Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Band 3, Hippokrates-Verlag (1958)

ERLACHER, P.R.: Direkte Kontrastdarstellung des Nucleus pulposus, zugleich ein Beitrag zur Pathologie der Bandscheibe. Z. Orthop. 80, 40-57 (1951)

FARFAN, H.F.: HUBERDEAN, R.M.: DUBOW, H.J.: Lumbar Intervertebral Disc Degeneration: the influence of geometrical features on the pattern of disc degeneration - A Post-mortem Study. J.Bone Joint Surg. (Am) 54, 492-510 (1972)

GAINER, JV. JR.: NUGENT, GR.: The herniated lumbar disc. Am. Fam. Physician, 10, 127-131 (1974)

GÖCKE, C.: Das Verhalten der Bandscheiben bei Wirbelverletzungen. Verh. Dtsch. Orthop. Ges. 26, 291 (1931)

GRAFF, U.: Über das sog. Verheben im Kreuz. Mschr. Unfallkrh. 53, 193 (1952)

GROH, H.: Die Belastung der Bandscheiben der Wirbelsäule. Deutsch.Ärztebl. 65, 746 (1968)

GROH, H.: Über einige Grundfragen biomechanischer Untersuchungen. Med. Welt 22/8, 275 (1971)

HALL, D.A.: LLOYD, P.F.: HAPPEY, F.: HORTON, W.G.: NAYLOR, A.: Mucopolysaccharides of human nuclei pulposi. Nature 179, 1078 (1957)

HANSEN, H.J.: Diskusdegeneration bei Tieren. Neuere Aufgaben für die vergleichende Bandscheibenpathologie. In: Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Bd. 15, Hippokrates-Verl.(1960)

HARRIS, R.: und MAC NAB, J.: Structural changes in the lumbar intervertebral discs. J. Bone Joint Surg. 36B, 304 (1954)

HARTMANN, F.: Bau und Eigenschaften der Zwischenwirbelscheiben unter krankhaften Bedingungen. In: Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Bd. 15. Hippokrates-Verlag, Stuttgart (1960)

HARTMANN, F.: Pathophysiologie der Zwischenwirbelscheiben.
In: Wirbelsäule und Nervensystem, Thieme-Verlag, Stuttgart (1970)

HERBERT, J.J.: Lombalgies, etude mechanique, traitements orthopediques et chirurgicaux.
Rheumatologie 5, 295-337 (1953)

HIRSCH, C.: Pathophysiologie und Mechanik der aseptischen Zwischenwirbelkrankheiten.
In: Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Bd. 15,
Hippokrates-Verlag, Stuttgart (1960)

HIRSCH, C.: und SCHAJOWICZ, F.: Studies on Structural Changes in the Lumbar Anulus Fibrosus.
Acta Orthop. Scand. 22, 184-231 (1952-1953)

HOFMANN, A.: Nucleus-pulposus-Prolaps.
Zbl. Chir. 1 (1940)

IDELBERGER, K.H.: Beitrag zur Diagnose und orthopädischen Behandlung des Bandscheibenprolapses.
Langenbecks Arch. 263, 180-200 (1949)

IDELBERGER, K.H.: Lehrbuch der Orthopädie.
Springer-Verlag, Heidelberg (1975)

INGELMARK, B.E.: und EKHOLM, R.: Über die Kompressibilität der Intervertebralscheiben.
Acta Sec. Med. Upsaliensis 17, 202 (1952)

JAEGER, F.: Der Bandscheibenvorfall.
De Gruyter und Co., Berlin (1951)

JASTER, D.: Lumbaler Bandscheibenvorfall bei Jugendlichen.
Beitr. Orthop. Traumatol. 21, 389-393 (1974)

JUNGE, H.: Kontrastdarstellung im Bereich der Wirbelsäule.
In.: Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Bd. 4,
Hippokrates-Verlag, Stuttgart (1957)

JUNGHANNS, H.: Die gesunde und die kranke Wirbelsäule in Röntgenbild und Klinik.
Thieme-Verlag, Stuttgart (1968)

KEY, J.A.: und FORD, L.T.: Experimental Intervertebral Disc Lesions. J. Bone Joint Surg. 30 A, 621 (1949)

KRÄMER, J.: Zum Stoff- und Flüssigkeitsaustausch in der Bandscheibe. Z. Orthop. 111, 557-560 (1973)

KRÄMER, J.: Biomechanische Veränderungen im lumbalen Bewegungssegment. Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Bd. 58. Hippokrates-Verlag, Stuttgart (1973)

KRAYENBÜHL, H.: und ZANDER, E.: Über lumbale und zervikale Diskushernien. Docum. Rheum. GEIGY I.

KUHLENDAHL, H.: und RICHTER, H.: Morphologie und funktionelle Pathologie der Lendenbandscheiben. Langenbecks Arch. 272, 519 (1952)

KUNZ, W.: Die Behandlung der degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen. Z. Allg. Med. 4, 156 (1971)

LANG, F.: Pathologie der Bandscheiben. In: Kaufmann: Spezielle pathologische Anatomie, Bd. 2, 4.Teil. De Gruyter, Berlin (1962)

LANGE, M.: Lehrbuch der Orthopädie und Traumatologie. Thieme-Verlag, Stuttgart (1965)

LANGEN, H.H.: Betrachtungen über Wirbelsäulenrheuma, generelles Wirbelsäulensyndrom bzw. Bandscheibenschaden nach Haltungsanomalien und Wirbelsäulenerschütterungen. Ztschr. Therapie, 99-113 (1963)

LINDEMANN, K.H.: und KUHLENDAHL, H.: Die Erkrankungen der Wirbelsäule. Enke-Verlag, Stuttgart (1953)

LUSCHKA, H.: Die Nerven des menschlichen Wirbelkanals. Tübingen (1850)

LUSCHKA, H.: Die Altersveränderungen des Zwischenwirbelknorpels. Virch. Arch. 9, 309 (1856)

LUSCHKA, H.: Die Halbgelenke des menschlichen Körpers. Berlin (1958)

MAIGNE, R.: Wirbelsäulenbedingte Schmerzen und ihre Behandlungen durch Manipulationen. Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Bd.45. Hippokrates-Verlag, Stuttgart (1970)

MOHING, W.: Die Bedeutung der Bandscheibendegeneration und der von ihr abhängigen Krankheitsbilder. Fortschr. Med. 73, 505 (1 55)

MORRIS, J.M.: Biomechanics of the Spine. Arch. Surg. 107, 418-423 (1973)

MÜNCHINGER, R.: Die auf die Wirbelsäule wirkenden mechanischen Kräfte. Rheum. in Forschung und Praxis, Bd. 2, 136 (1964)

NACHEMSON, A.: Lumbar Intradiscal Pressure. Acta Orthop. Scand. 43 (1959)

OTT, A.: Quellungsversuche mit operativ entferntem Bandscheibengewebe. Z. Orthop. 84, 577 (1954)

PLAUE, R.: GERNER, H.J.: SALDITT, R.: Das elastomechanische Verhalten menschlicher Bandscheiben unter statischem Druck. Arch. Orthop. Unfallchir. 79, 139-148 (1974)

REICHMANN, S.: BERGLUND, E.: LUNDGREN, K.: Das Bewegungszentraum in der Lendenwirbelsäule bei Flexion und Extension. Z. Anat. Entwicklungsgesch. 138, 283-287 (1972)

REISCHAUER, F.: Untersuchungen über den lumbalen und zervikalen Wirbelbandscheibenvorfall. Thieme-Verlag, Stuttgart (1949)

REMAK, S.T.: Zur Genese der lumbalen, insbesondere multiplen Bandscheibenvorfälle im jugendlichen Lebensalter. Med. Diss. Berlin (1958)

ROOFE, P.: Innervation des Anulus fibrosus und Lig. longit. post. Arch. Neurol. und Psychiatr. 44, 100 (1940)

ROTHMANN, R.H.: The Pathophysiology of Disc Degeneration.
Chir. Neurosurg. 20, 174-182 (1973)

RÜTT, A.:
JOCHHEIM, K.:
LOEW, F.: Lumbaler Bandscheibenvorfall, konservative und operative Behandlung.
Springer-Verlag, Heidelberg (1961)

SCHENK, R.: Funktionelle Anatomie der Wirbelsäule.
In: Funktionsstörungen der Wirbelsäule.
Hans-Huber-Verlag, Bern (1964)

SCHLEGEL, K.: Zur Ätiologie der Diskopathien.
Med. Klin. 49, 1159 (1954)

SCHLEGEL, K.: Das lumbale Syndrom.
Med. Klin. 49, 1929 (1954)

SCHMORL, G.: Zur pathologischen Anatomie der Lendenbandscheiben.
Klin. Wschr.II. (1932)

SCHMORL, G.: Über Verlagerungen von Bandscheibengewebe und ihre Folgen.
Arch. Klin. Chir. 172, 240 (1932)

SCHRADER, E.: Der Bau der Zwischenwirbelscheiben in seinen Beziehungen zur Beanspruchung.
Z. Orthop. Chir. Bd. 53, H.I, 6 (1930)

SCHÜMMELFELDER, W.: Lebensalter und Wasserhaushalt der Zwischenwirbelscheiben.
Chir. 20, 395 (1949)

SÖDERBERG, L.:
und
ANDREN, L.: Disc Degeneration and Lumbago-ischias.
Acta Orthop. Scand. 25, 137 (1955)

TÖNDURY, G.: Die Lebenskurve der Zwischenwirbelscheiben.
In: Wirbelsäule und Nervensystem.
Thieme-Verlag, Stuttgart (1970)

TÖNDURY, G.: Zur Anatomie und Entwicklungsgeschichte der Wirbelsäule mit besonderer Berücksichtigung der Altersveränderungen der Bandscheiben.
Schweiz. Med. Wschr. 85, 828 (1955)

ÜBERMUTH, H.: Die Bedeutung der Altersveränderungen der menschlichen Bandscheiben für die Pathologie der Wirbelsäule.
Arch. f. Klin. Chir. 156, 567 (1929)

VIERNSTEIN, K.:
HIPP, E.:
OEHLER, W.:
Der lumbale Bandscheibenvorfall.
Zschr. Orthop. 92, 11-25 (1960)

BÜRGER, G.:
Anatomische und funktionelle Untersuchungen über den Bandscheibenprolaps.
Langenbecks Arch. 265, 329c (1950)

WASSILEV, M.:
DIMOVA, R.:
Der Einfluß der mechanischen Faktoren auf die Struktur der Zwischenwirbelscheiben.
Arch. Orthop. Unfallchir. 68, 273-281 (1970)

WEIGERT, M.:
HIPP, E.:
Haltungsstörungen und röntgenologische Veränderungen an der Lendenwirbelsäule beim Bandscheibenschaden.
Z. Orthop. 101, 313 (1966)

ZUKSCHWERDT, L.:
EMMINGER, E.:
BIEDERMANN, F.:
ZETTEL, H.:
Wirbelgelenk und Bandscheibe.
2.Auflage
Hippokrates-Verlag, Stuttgart (1960)

LEBENSLAUF

Am 6.Sept.1952 wurde ich als erstes Kind des Zahnarztes Dr.Herbert Vogel und seiner Ehefrau Dr.Brunhild Vogel geb. Hansen in Köln geboren.

Ich besuchte von Ostern 1959 bis Ostern 1963 die Grundschule und legte im Frühjahr 1971 nach neunjährigem Besuch des Gymnasiums Kaiserin-Augusta-Schule in Köln die Reifeprüfung ab.

Im Wintersemester 1971 wurde ich an der Universität Düsseldorf für das Studium der Medizin eingeschrieben, das ich im Herbst 1978 mit Ablegung des med. Staatsexamens abschließen werde.